

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Русин Ірина Богданівна

УДК 606:621.3: 620.951/952:574.46

ДИСЕРТАЦІЯ

**БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРИКИ
У РОСЛИННО-МІКРОБНИХ БІОСИСТЕМАХ**

03.00.20 Біотехнологія

Біологічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Русин І.Б.

Науковий консультант Дячок В.В., доктор технічних наук, професор

Львів 2023

АНОТАЦІЯ

Русин І.Б. Біотехнологічні основи отримання електрики у рослинно-мікробних біосистемах. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук за спеціальністю 03.00.20 «Біотехнологія» – Національний університет «Львівська Політехніка», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерство освіти і науки України, Львів, 2023.

Катастрофічні наслідки глобальної зміни клімату: аномальна спека і затоплення, руйнівні урагани і посуха, які стали відчутні в кожному куточку планети в останні роки та прогнозоване затоплення цілих країн спонукають людство шукати нові екологічно безпечні енергоефективні технології із скороченням викидів парникових газів. В рамках переходу на нову стратегію вуглець-нейтральності, вагома роль відводиться біотехнологічним альтернативним джерелам енергії та озелененню, що визначається як важливий інструментарій боротьби, як з наслідками, так із причинами глобальної зміни клімату. В планах розвитку закладаються нові екологічні принципи екоміст із енергоефективними будинками та зеленими дахами на будівлях. В даному контексті розвиток інноваційної біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики для будинків та зелених дахів і природних екосистем, що представлено у дисертаційній роботі, має велику актуальність та практичне значення. Дослідження отримання біоелектрики із зелених насаджень як різновиду альтернативної енергетики швидко розвивається протягом останнього десятиліття. Оскільки теоретично розрахований максимум потужності енергії рослинно-мікробної біотехнології поки що недосягнутий, а також, актуальними є проблеми економічності і компактності та запобігання сезонним втратам

електроенергії, важливими є експерименти, які спрямовані в напрямку їх вирішення.

Дисертаційна робота присвячена розробці нової і екологічно безпечної, ефективної та бюджетної біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики для енергоефективних будинків і їх дахів та оцінці біоелектропродуктивного потенціалу природних екосистем *in situ*. Сконструйовано кілька нових ефективних біосистем генерації біоелектрики для цілорічного використання у будинках і зелених дахах та досліджено їх ефективність в залежності від низки чинників: біологічних (внесення активних мікроорганізмів і аннелід, розвитку зеленої та кореневої біомаси, росту і виду рослин), технологічних (електродних матеріалів, способів підключення та структури біомодуля) та чинників середовища (температури і кількості опадів). Застосування бюджетних матеріалів в конструюванні біосистем, в тому числі, відходів електротранспорту як катодів, відходів харчової промисловості як контейнерів, а також, насіння рослин і саджанців широко поширених рослин та простих субстратів здешевлюють вартість біотехнології отримання біоелектрики без втрат ефективності.

Біосистема, базована на водному подорожнику *Alisma plantago-aquatica* та її природних ризосферних мікроорганізмів дає змогу отримувати біоелектрику протягом всього року у енергоефективних будинках всередині приміщення. Показано високу кореляцію між генерацією біоелектрики та ростом рослин (коефіцієнт Пірсона становив від 0.67 до 0.98 в залежності від умов). Електропродуктивність біотехнологічних систем найвища у весняно-літній період та початок осіннього періоду в час найбільшої фотосинтетичної активності рослин. Найвища зафіксована сила струму рівна 58.6 мА при зовнішньому навантаженні 10 Ω та максимальна потужність енергії 0.702 мВт/м² PGA (plant growth area) при 200 Ω . Завдяки використанню саджанців рослин біотехнологія ефективно працює з перших днів після інсталяції та практично на повну потужність через 2 тижні після внесення в субстрат паростків рослин. Сезонне зниження продукції біоелектрики рівне 8.71% в при температурі 21±3°C та додатковим освітленням (12 годин). На закритих терасах та зашкленних балконах,

що не опалюються, при різких температурних коливаннях від 5 до 26°C, продукція біоелектрики знижується в осінньо-зимовий період 39.91% без внесення сульфатредуючих бактерій та на 19.98% із додаванням сіркобактерій. Біотехнологічна система продовжує генерувати біоелектрику і після загибелі рослин та припинення їх фотосинтетичної активності завдяки активності електрогенеруючих мікроорганізмів, ймовірно, за рахунок рослинного опаду і накопичених запасних речовин та під індукцією бактерій *Desulfovibrio sp.* Даний факт відкриває перспективи бактерій *Desulfovibrio sp.* як важливого інструменту підсилення функціональності біосистем генерації біоелектрики.

Біотехнологічна система з *Festuca arundinacea* ефективна круглорічно, а сезонне зниження рівня біоелектрики складає 13.18 %. Біосистема з *F. arundinacea* характеризувалася на 20.95 % вищою потужністю та була в 1.5 раз більш економічно вигідною, ніж біосистема з *A. plantago-aquatica*, що дає можливість використовувати її в енергоефективних будинках всередині як джерело біоелектрики. Коефіцієнт Пірсона показує високу кореляцію розвитку рослин та генерації біоелектрики біосистемою і складає 0.85.

Біосистеми з *A. plantago-aquatica* та *F. arundinacea* є фундаментом для розробки біосистем енергоживлення приладів, які споживають 50 – 100 мА та для LED-освітлення всередині будинків.

Позитивний ефект бактерій *Desulfovibrio sp.* та анелід *Lumbricus terrestris* як енхансерів, які підвищують генерацію біоелектрики біосистем з *A. plantago-aquatica* та *C. palustris* складав до 32.83% та 14.32% відповідно.

Вперше досягнуто прогресу в компактності та кількості модулів біосистем при збереженні виходу біоелектрики. Показано позитивний вплив збільшення площі електродів та скорочення міжелектродної відстані на величини отримуваної біоелектрики в біосистемі, що виявлявся в різній мірі при різних застосовуваних опорах. При послідовному з'єднанні трьох та шести багатоелектродних біосистем напруга зростала в 2.9 – 6.3 раз, відповідно. При паралельному з'єднанні двох багатоелектродних біосистем сила струму зростала в 2.1 рази. Збільшення площі електродів одного біомодуля в 10 разів призводить до

збільшення питомої потужності при 200 Ом в 3.95 раз. Продемонстровано зростання показників біоелектрики до 1.8 раз із скороченням відстані між електродами від 10 см до 1 см як при використанні опорів, так і без застосування навантаження ($P < 0.05$). Досліджені закономірності дозволили розробити ефективний та компактний 0.6 л 4-електродний біомодуль шляхом паралельного з'єднання двох катодів та паралельного з'єднання двох анодів з розмірами 12x9.5x5.5 см. Біомодуль характеризувався в середньому 1.02 ± 0.03 В в умовах відкритого кола та струмом короткого замикання 3.79 ± 0.11 мА. На його основі було розроблені дво- і три-модульні багатоелектродні біосистеми, базовані на прямих чи декоративних рослинах *Ocimum basilicum* і *Helsinia soleirolii*, які служили автономним та екологічно чистим джерелом живлення для кімнатної метеостанції, цифрового годинника, цифрового термометра/гігрометра та світлодіодів в режимі реального часу, замінюючи батарейки 1.5 В та 3.0 В. Максимальні зафіксовані значення густини струму в тримодульній біосистемі становили 407 мА/м² та густини потужності 188 мВт/м² PGA.

Показана можливість та перспективність використання мохів як біокомпонента біосистем на дахах. Температура повітря та кількість опадів сукупно мали суттєвий вплив на функціонування даних біосистем на дахах та генерацію ними біоелектрики. Біосистеми з мохами функціонували на повну потужність при температурі вище $+10^{\circ}\text{C}$ та відсутності тривалих посух. Біосистеми, де конфігурація електродів забезпечувала в 1.65 рази більшу площу контакту з субстратом, дозволяли отримувати вищі в 1.22 рази значення біоелектрики. Проте технологічно їх контакти між електродами є більш вразливими до пошкодження силою розширення замерзлої води та вони в більшій мірі виходили з ладу після зимового періоду. Було вдосконалено структуру біомодулей і розроблено біосистеми, які функціонують з стабільними параметрами після зимового періоду.

Осока шершаволиста *Carex hirta* є оптимальним біокомпонентом біосистем генерації біоелектрики для експлуатації у відкритому ґрунті на дахах, оскільки є зимостійкою, виживає в посушливих умовах та швидко відновлює

електроактивність після зволоження. Біосистема на основі осоки *C. hirta* характеризувалися максимальною потужністю 950 мВт/м² PGA та була ефективнішою в 1.7 разів від системи на основі мохів, що розкриває перспективи її використання для генерації біоелектрики на дахах при температурі вище 0°C та кількості опадів 5 мм/день.

Тип кореневої системи, і, зокрема, наявність розвинутої мичкуватої кореневої системи чи кореневища, а також, високе накопиченням фотосинтетичної і кореневої маси є важливими прогностичними факторами для вибору ефективного рослинного біокомпонента для біосистем.

Показано перспективність екосистем лісів, екосистем заболочених луків, агроекосистем фруктових дерев і садових кущів та агрокультур *Zea mays*, а також, урбоекосистем паркових та лісопаркових зон, техногенно забруднених газонів розділяючих зелених смуг з помірним забруднення важкими металами вздовж автомагістралей міста як джерела поновлюваної та стабільної зеленої енергії в кліматичних умовах заходу України. Біоелектрика фітомікробіоценозів агрокультур, сильно забруднених газонів вздовж автотрас та біотопів занедбаних паркових зон з ущільненим ґрунтом внаслідок антропогенного навантаження була нижчою на 9.18%, 14.43% та 20.29% відповідно від біотопів екосистем лісу ($P < 0.05$).

Фітомікробіоценоз зелених смуг вздовж автотрас є високорезистентним до забруднення важкими металами. Суттєве зниження їх біоелектропродуктивності спричиняється забрудненням лише одночасно кількома металами високого класу небезпеки, що перевищують ГДК (гранично допустиму концентрацію) більше як в 10 разів. Даний факт відкриває перспективи цього фітомікробіоценозу як джерела електрики, оскільки даний тип забруднення зустрічається лише на невеликому сегменті розділяючих зелених смуг вздовж автотрас.

Вперше розроблено біосистеми на основі нової пари електродів: графітових катодів і перфорованих оцинковано-сталевих анодів та на їх основі багатоелектродні біомодулі. Розроблена біотехнологія є основою для автономних датчиків і систем моніторингу екосистем, біоіндикаторів їх стану та LED (light

emitting diod) освітлення як для енергоефективних будинків, так і для використання *in situ*. Біотехнології в землях сільськогосподарського призначення можуть служити єдиним джерелом енергії для датчиків вологості ґрунту, інноваційних систем моніторингу за складом ґрунту і ростом рослин та автономних систем поливу. В містах рослинно-мікробна біоелектрика може забезпечувати LED освітлення паркових територій та дитячих майданчиків, живити придорожнє освітлення. Застосування прямих і декоративних рослин в складі запропонованої біотехнології надає їй подвійне практичне значення: як поновлювального джерела електрики, а також для декорування приміщень або для кулінарії.

Використання рослинно-мікробних біосистем замість батарейок для живлення приладів дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів на виробництво батарейок та нівелювати проблему їх утилізації. Впровадження біосистем в енергоефективних будинках та природних екосистемах має істотне значення для зменшення емісії парникових газів через зниження експлуатації традиційних відновлювальних джерел енергії.

Запропонована ідея комбінації паралельно-послідовного з'єднання багатоелектродних біосистем та редукування міжелектродної відстані є ефективним способом максимізації отриманої рослинно-мікробної біоелектрики. Розкритий потенціал екосистем *in situ* та сконструйовані біотехнології для енергоефективних будівель містять нові підходи в біологічному і технологічному компонентах, що мають прогрес у економічності, ефективності і цілорічному зборі біоелектрики, відкриваючи широкі перспективи для подальшого вдосконалення збору рослинно-мікробної біоелектрики.

Ключові слова: біоелектрика, біотехнологія, біоелектричні системи, рослинно-мікробний паливний елемент, рослини, мікроорганізми, важкі метали, ґрунт

SUMMARY

Rusyn I.B. Biotechnological fundamentals of electricity generation in plant-microbial biosystems. – Manuscript.

Dissertation Thesis for the degree of Doctor of Biological Sciences in speciality 03.00.20"Biotechnology". – Lviv Polytechnic National University, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2023.

The catastrophic effects of global climate change: an anomalous heat and floods, devastating hurricanes and droughts that have been felt in every corner of the globe in recent years, predicted floodings of entire countries force humanity to seek new energy-efficient greenhouse gas emission reduction technologies. Within the framework of the transition to a carbon-neutral new development strategy, biotechnology and greenings play an essential role, which is defined as an important tool for combating both the consequences and the causes of global climate change. New ecological principles with energy effective buildings and green roofs are laying down in urban development plans. In this context, the development of an innovative biotechnology of the production of plant-microbial bioelectricity in ecosystems, on green roofs and inside of buildings, which is the subject of research of the dissertation, have great practical importance. Research of production of bioelectricity from green spaces as a form of alternative energetics has been developing rapidly over the last decade. Because the theoretically calculated maximum power of the biotechnology is not yet reached, the work of scientists all over the world is aimed at improving technology for increasing electrical productivity and their compactiveness, as well as of budgetarity and preventing seasonal winter losses of electricity.

The dissertation thesis is devoted to the development of new and effective, ecological friendly and budgetary biotechnology of plant-microbial bioelectricity

generation inside of energy-efficient buildings and on green roofs as well as to the assessment of the bioelectricity potential of natural ecosystems *in situ*. Several new efficient biosystems were designed for year-round use in energy-efficient buildings and green roofs, and their functionality was investigated depending on the factors of the external environment (temperature and amount of precipitation), biological factors (introduction of active microorganisms and annelids, growth and type of plants) and technological factors (electrode materials, connection combinations and configurations of electrode systems). The use of budget materials in the construction of biosystems, including electric transport waste as cathodes, food industry waste as containers, as well as plant seeds and seedlings of widespread plants and simple substrates, reduce the cost of electrobiotechnology without loss of efficiency.

Biosystem based on the water plantain *Alisma plantago-aquatica* and its natural rhizospheric microorganisms makes it possible to receive bioelectricity throughout the year in energy-efficient buildings indoors. A high correlation between bioelectricity generation and plant growth was shown (Pearson's coefficient ranged from 0.67 to 0.98, depending on the conditions). The electrical productivity of biotechnological systems is highest in the spring-summer period and the beginning of the autumn period at the time of the greatest photosynthetic activity of plants. The highest recorded current is 58.6 mA at an external load of 10 Ω and the maximum energy output is 0.702 mW/m² PGA (plant growth area) at 200 Ω . Thanks to the use of plant seedlings, biotechnology works effectively from the first days after installation and practically at full capacity 2 weeks after the introduction of plant sprouts into the substrate. The seasonal decrease in bioelectricity production is equal to 8.71% at a temperature of 21±3°C and additional lighting (12 hours). On closed terraces and glazed balconies that are not heated, with sharp temperature fluctuations from 5 to 26°C, the production of bioelectricity decreases in the autumn-winter period by 39.91% without the introduction of sulfate-reducing bacteria and by 19.98% with the addition of sulfur bacteria. The biotechnological system continues to generate bioelectricity even after the death of plants and the cessation of their photosynthetic activity due to the activity of electricity-generating microorganisms, probably due to plant residues and accumulated reserve

substances and under the induction of bacteria *Desulfovibrio sp.* This fact opens the prospects of bacteria *Desulfovibrio sp.* as an important tool for strengthening the functionality of bioelectricity generation biosystems.

The biotechnological system with *Festuca arundinacea* is effective year-round, and the seasonal decrease in the level of bioelectricity is 13.18%. The biosystem with *F. arundinacea* was characterized by 20.95% higher power and was 1.5 times more cost-effective than the biosystem with *A. plantago-aquatica*, which makes it possible to use it in energy-efficient houses inside as a source of bioelectricity. The Pearson coefficient shows a high correlation between the development of plants and the generation of bioelectricity by the biosystem and is 0.85.

Biosystems with *A. plantago-aquatica* and *F. arundinacea* are the foundation for the development of biosystems for powering devices that consume 50-100 mA and for LED lighting (light emitting diode) in the middle of buildings.

The positive effect of bacteria *Desulfovibrio sp.* and annelid *L. terrestris* as enhancers of biosystems of bioelectricity generation with *A. plantago-aquatica* and *C. palustris* was up to 32.83% and 14.32%, respectively.

For the first time, progress in the compact size and number of modules of biosystems has been achieved while maintaining the output of bioelectricity. The positive effect of increasing the electrode area and reducing the inter-electrode distance on the bioelectricity generation in the biosystem was shown, which was manifested to varying degrees at different applied resistances. When three and six multi-electrode biosystems were connected in series, the voltage increased by 2.9–6.3 times. When two multi-electrode biosystems were connected in parallel, the current strength increased by 2.1 times. A 10-fold increase in the area of the electrodes of one biomodule leads to a 3.95-fold increase in specific power at 200 Ohms. An increase in bioelectricity parameters up to 1.8 times was demonstrated with a reduction in the distance between electrodes from 10 cm to 1 cm both when using resistors and without applying a load ($P < 0.05$). The studied regularities made it possible to develop an efficient and compact 0.6 L 4-electrode biomodule by parallel connection of two cathodes and parallel connection of two anodes with dimensions of 12x9.5x5.5 cm. The biomodule was

characterized by an average of 1.02 ± 0.03 V in open-circuit conditions and a short-circuit current of 3.79 ± 0.11 mA. On its basis it was developed two- and three-module 0.6L multielectrode biosystems based on spicy or ornamental plants *Ocimum basilicum* and *Helsinia soleirolii* served as autonomous and environmentally friendly power sources for indoor weather station, digital clock, digital thermometer/hygrometer and real-time LEDs, replacing 1.5V and 3V batteries.

Biosystem based on *Carex hirta* sedge was characterized by higher resistance to weather factors and a maximum power of 950 mW/m² PGA and was 1.7 times more efficient than the system based on mosses on green roofs at a temperature above 0°C and an amount of precipitation of 5 mm/day. The maximum recorded values of current density in the three-module biosystem were 407 mA/m² and power density 188.33 mW/m² PGA.

The possibility and perspective of using mosses as a biocomponent of biosystems on roofs is shown. The air temperature and the amount of precipitation collectively had a significant impact on the functioning of these biosystems on the roofs and their generation of bioelectricity. Biosystems with mosses functioned at full capacity at a temperature above +10°C and in the absence of long droughts. Biosystems where the electrode configuration provided a 1.65 times larger contact area with the substrate allowed obtaining 1.22 times higher values of bioelectricity. However, technologically, their contacts between the electrodes are more vulnerable to damage by the force of expansion of frozen water and they were more likely to fail after the winter period. The structure of biomodules was improved and biosystems were developed that function with stable parameters after the winter period.

C. hirta sedge is the optimal biocomponent of bioelectricity generation biosystems for operation in open soil on roofs, as it is winter-hardy, survives in arid conditions and quickly restores electrical activity after wetting. The biosystem based on *C. hirta* sedge was characterized by a maximum power of 950 mW/m² PGA and was 1.7 times more efficient than the system based on mosses, which reveals the prospects of its use for the generation of bioelectricity on roofs at a temperature above 0°C and an amount of precipitation of 5 mm/day.

The type of root system, and in particular the presence of a developed nodular root system or rhizome, as well as the high accumulation of photosynthetic and root mass are important prognostic factors for the selection of an effective plant biocomponent for biosystems.

The perspective of forest ecosystems, marshy meadow ecosystems, agroecosystems of fruit trees and garden bushes and *Zea mays* agricultural crops, as well as urban ecosystems of park and forest park zones, technogenically polluted lawns separating green lanes with moderate contamination by heavy metals along city highways as a source of renewable and stable green bioelectricity in the climatic conditions of western Ukraine is shown. Bioelectricity of phytomicrocoenoses of agricultural crops, intensively polluted lawns along highways, and biotopes of abandoned park areas with compacted soil due to anthropogenic load was lower by 9.18%, 14.43%, and 20.29%, respectively, than biotopes of forest ecosystems ($P < 0.05$).

Phytomicrobocenosis of green strips along highways is highly resistant to pollution by heavy metals. A significant decrease in their bioelectric productivity is caused by simultaneous contamination with several metals of a high level of danger, exceeding the MPC by more than 10 times. This fact opens the prospects of this phytomicrocoenosis as a source of electricity, since this type of pollution is found only on a small segment of dividing green lanes along highways.

Biosystems based on a new pair of electrodes: graphite cathodes and perforated galvanized steel anodes and multielectrode biomodules based on them were developed for the first time.

The developed biotechnology is the basis for autonomous sensors and ecosystem monitoring systems, bioindicators of their condition and LED lighting for both energy-efficient buildings and for in situ use. Biotechnologies in agricultural lands can serve as a single source of energy for soil moisture sensors, innovative monitoring systems for soil composition and plant growth, and autonomous irrigation systems. In cities, plant-microbial bioelectricity can provide LED lighting of park areas and playgrounds, power roadside lighting. The use of spicy and decorative plants as part of the proposed

biotechnology gives it a double practical value: as a renewable source of electricity, as well as for decorating premises or for cooking.

The use of plant-microbial biosystems instead of batteries for powering devices allows you to significantly reduce resource costs for the production of batteries and eliminate the problem of their disposal. The implementation of biosystems in energy-efficient buildings and natural ecosystems is essential for reducing the emission of greenhouse gases due to the reduction of the exploitation of traditional renewable energy sources.

The proposed idea of a combination of parallel-serial connection of multielectrode biosystems and reduction of the inter electrode distance is an effective way of maximizing the obtained plant-microbial bioelectricity. The revealed potential of *in situ* ecosystems and engineered bioelectrical technologies for energy-efficient buildings contain new approaches in biological and technological components that have progress in economy, efficiency and year-round bioelectricity collection, opening broad perspectives for further improvement of plant-microorganism bioelectricity collection.

Keywords: bioelectricity, biotechnology, bioelectrical system, plant-microbial fuel cell, plants, microorganisms, heavy metals, soil

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації, які розкривають основний зміст дисертації:

Розділ монографії

1. **Русин І. Б., Дячок В. В.** (2020). Перспективи використання природних лісових екосистем для отримання рослинно-мікробної біоелектрики. В: Колективна монографія «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» Львів, ТзОВ "ЗУКЦ", 124-140. *(здобувачу належить ідея дослідження, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання розділу монографії)*

Статті у наукових виданнях інших країн та індексованих міжнародними наукометричними базами даних Scopus та Web of Science

2. Apollon, W., **Rusyn, I.**, González-Gamboa, N., Kuleshova, T., Luna-Maldonado, A.I., Vidales-Contreras, J.A., & Kamaraj, S.-K. (2022). Improvement of zero waste sustainable recovery using microbial energy generation systems: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 817, 153055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153055>. **Scopus Q1, Web of Science, Netherlands** *(здобувачу належить частина робочих гіпотез та планування статті, аналіз та обґрунтування літературних даних, написання статті)*
3. **Rusyn, I.B.** (2021). Role of microbial community and plant species in performance of plant microbial fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111697 (19p). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111697>. **Scopus Q1, Web of Science,**

United Kingdom (здобувачу належить ідея статті, аналіз літературних даних, обґрунтування і формування висновків, написання статті)

4. **Rusyn, I.B.**, Medvediev, O.V., & Valko, B.T. (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323-1334. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02934-3>. **Scopus Q2, Web of Science, Iran** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
5. **Rusyn, I.**, Malovanyu, M., Tymchuk, I., Synelnikov, S. (2020). Effect of mineral fertilizer encapsulated with zeolite and polyethylene terephthalate on the soil microbiota, pH and plant germination. *Ecological Questions*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.12775/EQ.2021.007> **Scopus Q4, Poland** (ідея дослідження належить співавторам, здобувачу належить розробка робочих гіпотез, планування експериментів, проведення всіх експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
6. **Rusyn, I.B.**, & Hamkalo, Kh.R. (2020). Electro-biosystems with mosses on green roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(1), 20-31. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.1.22212>. **Scopus Q4, Lithuania** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
7. **Rusyn, I.B.**, Vakuliuk, V.V., & Burian, O.V. (2019). Prospects of use of *Caltha palustris* in soil plant-microbial eco-electrical biotechnology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(2), 233-238. <https://doi.org/10.15421/021935>. **Scopus Q4, Web of Science, фахове видання категорії А** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів,

проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

8. **Rusyn, I.B., & Valko, B.T.** (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20(3), 211-229. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674>. **Scopus Q3, USA** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
9. **Rusyn, I.B., & Hamkalo, Kh.R.** (2019). Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(1), 39-44. <https://doi.org/10.15421/021906>. **Scopus Q4, Web of Science, фахове видання категорії А** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
10. **Rusyn, I.B., & Hamkalo, Kh.R.** (2018). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62 (2), 170-179. <https://doi.org/10.14232/abs.2018.2.170-179>. **Scopus Q3, Hungary** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
11. **Moroz, O.M., Kulachkovs'kyi, O.R., Rusyn, I.B., Gnatush S.O., Pavlova, I.O., Lytvyn, Z.V.** (2007). Ethanol into acetaldehyde bioconversion by mutant strains of *Hansenula polymorpha* Felcao de Morais & Dália Maia. *Mikrobiologichnyi zhurnal (Kiev, Ukraine : 1993)*, 69(1), 20-34. **Scopus Q4** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

Статті у інших наукових фахових виданнях України

- 12. Русин, І.Б.,** Медведєв, О.В., & Дячок, В.В. (2021). Конструювання мультиелектродних електро-біосистем з *L. minor*. *Екологічні науки*, 39, 103-105. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.16>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 13. Русин, І.Б.,** & Дячок, В.В. (2021). Роль перемішування субстрату для ефективності водних електро-біосистем. *Екологічні науки*, 38, 29-31. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.5-38.6>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 14. Русин, І.Б.,** & Дячок, В.В. (2021). Залежність біоелектричних параметрів електро-біосистем від площі електродів. *Екологічні науки*, 37, 162-165. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.24>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 15. Rusyn, I.,** & Djachok, V. (2021). Effect *Lemna minor* population density on bioelectric parameters of electro-biosystems. *Environmental problems*, 6(4), 6(4), 195-200. <https://doi.org/10.23939/ep2021.04.195>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини

експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

- 16. Русин, І.Б.,** Медведєв, О.В., & Дячок, В.В. (2021). Вплив міжелектродної відстані на біоелектричні показники електро-біосистем. *Екологічні науки*, 36, 123-126. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.19>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 17. Rusyn, I., & Djachok, V.** (2021). Wetland meadows of *Carex acutiformis* as a source of bioelectricity. *Environmental problems*, 6(3), 125-129. <https://doi.org/10.23939/ep2021.03.125>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 18. Rusyn, I., & Djachok, V.** (2021). Bioelectric parameters of *Pinus silvestris* forest ecosystems. *Environmental problems*, 6(2), 59-63. <https://doi.org/10.23939/ep2021.02.059>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 19. Русин, І. Б.,** Медведєв, О.В., & Патлатюк, О.Ю. (2020). Перспективи отримання біоелектрики у паркових екосистемах міст. *Екологічні науки*, 29, 117-124. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.1.19>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

20. Русин, І.Б., Медведєв, О.В., Воронько, В.В. & Пашук, А.В. (2020). Вплив забруднення важкими металами на біоелектричний потенціал біотопів. *Екологічні науки*, 30, 53-59. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.9>. ***Index Copernicus International, фахове видання категорії В*** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
21. Русин, І.Б., Медведєв, О.В., Валько, Б.Т. (2020). Біоелектрика екосистем лісів, заболочених лук та агроекосистем Західної України. *Наукові праці Лісівничої Академії наук України*, 20, 33-44. <https://doi.org/10.15421/412003>. ***Index Copernicus International, фахове видання категорії В*** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
22. Мороз, О.М., & Русин, І.Б. (2012). Використання сполук нітрогену бактеріями циклу сульфуру озера Яворівське. *Мікробіологія та біотехнологія*, 2, 96-109. ***Index Copernicus International, Advanced Sciences Index, фахове видання*** (здобувачу належить проведення частини експериментів та аналізу результатів)
23. Джура, Н.М., Мороз, О.М., Русин, І.Б., Кулачковський, О.Р., Цвілінюк, О.М., & Терек, О.І. (2010). Вплив рослин бобу кормового (*Vicia faba* var. minor) на функціонування мікробних асоціацій метаболізму азоту в забрудненому нафтою ґрунті. *Ґрунтознавство*, 11(3-4), 105-112. ***Advanced Sciences Index, фахове видання*** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних)
24. Русин, І.Б., Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., Джура, Н.М., Мороз, О.М., & Новіков, В.П. (2009). Мікробіота нафтозабрудненого ґрунту, рекультивованого рослинами *Carex hirta*. *Мікробіологія і Біотехнологія*, 8,

41-47. *Advanced Sciences Index*, **фахове видання** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

25. Мороз, О.М., Джура, Н.М., Безноско, Г.Я., Перетятко, Т.Б., **Русин, І.Б.**, Цвілинюк, О.М., Кулачковський, О.Р., Терек, О.І., & Гудзь, С.П. (2006). Вплив рослин *Carex hirta* на мікрофлору нафтозабруднених ґрунтів. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, 19, 149-154. **фахове видання** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)
26. Мороз, О.М., Кулачковський, О.Р., **Русин, І.Б.**, Гудзь, С.П., Гнатуш, С.О., Перетятко, Т.Б., Паляниця, Б.Ю. & Кутько, І.О. (2004). Біогенез гліюкисом та деградативна інактивація ізоцитратліази і каталази у *Pex1* та *Pex1^{ts}* мутантів *Hansenula polymorpha*. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, 14, 148-153. **фахове видання** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

Статті у інших наукових періодичних наукових виданнях України

27. Сабадаш, В.В., **Русин, І.Б.**, Мальований, М.С., Гумницький, Я.М., Недадь, Х.М., & Аль, Х. (2011). Вплив гранульованих та капсульованих мінеральних добрив на фізико-хімічні властивості ґрунту та функціонування ґрунтової мікрофлори. *Сільський господар*, 5-6, 14-17 (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз частини результатів і формування частини висновків)
28. Джура, Н.М., Мороз, О.М., Цвілинюк, О.М., Терек, О.І., **Русин, І.Б.**, & Романюк О.І. (2008). Відновлення нафтозабрудненого ґрунту за участю рослин *Carex hirta*. *Збірник наукових праць Уманського державного аграрного університету „Основи формування продуктивності сільсько-господарських культур за інтенсивних технологій вирощування”*, 197-203.

(здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

Посібник

- 29. Русин, І. Б.** (2016). Основи біології: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. ФОП Афонін А.О. DoubleApublishing, Київ.
(здобувачу належить ідея посібника, аналіз літературних даних, написання посібника)

Патенти України на корисну модель

- 30. Русин, І.Б., & Медведєв, О.В.** (2018). Спосіб отримання біоелектрики із контейнера з рослинами за допомогою системи електродів. Патент України 122556, отриманий 28.08.2017, виданий 10.01.2018, бюл.1. *(особистий внесок: розробка формули, опрацювання літературних даних, планування і проведення експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, написання патенту)*
- 31. Русин, І.Б., & Медведєв, О.В.** (2016). Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту. Патент України 112093, отриманий 9 березня 2016, виданий 12 грудня 2016, бюл. 23. *(особистий внесок: розробка формули, опрацювання літературних даних, планування і проведення експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, написання патенту)*
- 32. Русин, І.Б., & Медведєв, О.В.** (2015). Спосіб прямого отримання біоелектрики з ґрунту. Патент України 98393, отриманий 17 листопада 2014, виданий 27 квітня 2015, бюл. 8. *(особистий внесок: розробка формули, опрацювання літературних даних, планування і проведення експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, написання патенту)*

Опубліковані праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

- 33. Rusyn, I.B., Djachok, V.V.** Електро-біосистеми на основі *L. minor*. І міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз

довкілля в умовах надзвичайних ситуацій-2022» (Полтава, 26-27 May 2022), 514-516. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

34. Rusyn, I.B., Djachok, V.V. Dependence of bioelectricity production from electrotechnological parameters of plant-microbial electro-biosystems. International scientific conference «Challenges, threats and developments in biology, agriculture, ecology, geography, geology and chemistry» (Lublin, Poland, July 2-3, 2021), 95-98. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

35. Русин, І.Б. Використання біотехнології рослинно-мікробних паливних елементів для отримання біоелектрики. XXII міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (20-21 травня 2021, Київ), 928-931. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

36. Rusyn, I., Valko, B., & Nikitchuk, S. (2019). Prospects of obtaining bioelectricity in ecosystems and settlements of border territories Poland and Ukraine. Miedzynarodova konferencja naukowa i praktyczna. Aktualne problemy ochrony srodowiska Ukrainsko-Polskiej strefy przygranicznej (23-25 October 2019, Lviv), 86-87. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

37. Rusyn, I.B., & Hamkalo, Kh.R. (2015). Receiving of bioelectricity from polluted areas. Збірник наукових праць V Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю (23-26 вересня 2015, Вінниця), 189. ТОВ «Нілан-ЛТД», Вінниця. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

38. Вакулюк, В.В., Бур'ян, О.В., & Русин, І.Б. (2015). Використання калюжниці болотяної для отримання біоелектрики *in situ*. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез XI Міжнародної наукової конференції (20-23 квітня 2015, Львів), 212-213. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та*

експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 39. Гамкало, Х.Р., & Русин, І.Б.** (2015). Вплив забруднення важкими металами на генерацію біоелектрики ґрунтовими мікроорганізмами в природних умовах. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез XI Міжнародної наукової конференції (20-23 квітня 2015, Львів), 216-217. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 40. Rusyn, I.B., & Patlatyuk, O.Y.** (2014). Innovative approach to generate energy with Microbe-plant associations of urban soil in a park areas. EPPESEM. 3-й міжнародний конгрес. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Збірник матеріалів (17-19 вересня 2014, Львів), 74, ТЗОВ «ЗУКЦ», Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 41. Rusyn, I.B.** (2014). Perspective using of bioelectricity of microbe-plant associations of urban soil. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application» (October 20-22, 2014, **Dubai, UAE**), 91-94. World Science, RS Global, Dubai. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 42. Rusyn, I.B.** (2014). Bioelectricity of plant-microbe associations of urban soil in a park areas. Proceedings of the 1st International Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Oceans Countries» (25 October 2014, **Tokyo, Japan**). Volume II, 75-78. Tokyo University Press, Tokyo. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 43. Патлатюк, О.Ю., Воронько, В.В., & Русин, І.Б.** (2014). Електроенергія, що генерується ґрунтовими мікроорганізмами в міській місцевості. «Біологія: від молекули до біосфери» Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих науковців (Харків, 18-20 листопада 2014), 153-154. ФОП Шаповалова

- Т.М., Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 44.** Бур'ян, О.В., Вакулук, В.В, & **Русин І.Б.** (2014). Калюжниця болотна як джерело біоелектроенергії на зелених дахах. Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих науковців «Біологія: від молекули до біосфери» (Харків, 18-20 листопада 2014), 147-148. ФОП Шаповалова Т.М., Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 45.** Нікітчук, С.В., Валько Б.Т., Воронько В.А., Селецький І.С., Стемпіцький Н.І., & **Русин І.Б.** (2014). Розробка технології збору біоелектрики ґрунту. «Біологія: від молекули до біосфери» Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих науковців (Харків, 18-20 листопада 2014), 152-153. ФОП Шаповалова Т.М., Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 46.** Nikitchuk, S.V., Valko, B.T., & **Rusyn, I.B.** (2014). Bioelectricity produced by microbial-plant association of forest and wet meadows of Polesseye. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез Х Міжнародної наукової конференції (8-11 квітня 2014, Львів), 138-139. СПОЛІОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 47.** Нікітчук, С.В., Валько, Б.Т., & **Русин, І.Б.** (2014). Біоелектрика мікроборослинних асоціацій. «Біотехнологія: звершення та надії»: збірник ІІІ Всеукраїнської науково практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених (15-16 травня 2014, Київ), 80. ВЦ НУБіП України, Київ. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 48.** Валько, Б.Т., Змислий, А.В., Нікітчук, С.В., & **Русин, І.Б.** (2013). Мікроборослинні асоціації ґрунту як альтернативне джерело енергії. «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансованого користування» Матеріали ІІ Міжнародної наукової конференції студентів,

- магістрантів, аспірантів та молодих вчених (5-6 грудня 2013, Харків), 14-15. ХНУ імені В. Н. Каразіна, Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 49. Валько, Б.Т., Змислий, А.В., Нікітчук, С.В., & Русин, І.Б.** (2013). Біоелектрика ґрунту та мікробо-рослинних асоціацій. «Біологія: від молекули до біосфери». Матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених (3-6 грудня 2013, Харків), 287-288. ФОП Шаповалова Т.М., Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 50. Русин, І.Б., & Сабадаш, В.В.** (2011). Стан ґрунтової мікрофлори при застосуванні капсульованих мінеральних добрив. «Біологія: від молекули до біосфери». Матеріали VI Міжнародної конференції молодих науковців (22-25 листопада 2011, Харків), 307-308. ФОП Шаповалова Т.М., Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 51. Русин, І.Б.** (2011). Біодеструкція вуглеводнів нафти за участю мікроорганізмів. X Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання». Збірник наукових статей (19-20 травня 2011, Львів), ЛьвЦНП, Львів, 212. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 52. Сайкевич, І., & Русин, І.** (2010). Біодеструкція вуглеводнів нафти азотфіксуючими і целюлозоруйнуючими бактеріями та дріжджами. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез VI Міжнародної наукової конференції (21-24 вересня 2010, Львів), 167. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 53. Сайкевич, І., & Русин, І.** (2010). Утилізація вуглеводнів нафти мікроорганізмами. Новітні досягнення біотехнології: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (21-22 жовтня 2010, Київ), 98-99.

- Мегапринт, Київ. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 54.** Фігурка, О., Фігурка, У., **Русин, І.**, & Новіков, В. (2009). Утилізація нафти та синтез біоПАР виділеними із нафтозабрудненого ґрунту азотфіксуючими та целюлозоруйнуючими мікроорганізмами. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез V Міжнародної наукової конференції (12-15 травня 2009, Львів), Том 2,166. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 55.** **Русин, І.Б.**, Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., & Новіков, В.П. (2008). Синтез біоПАР мікроорганізмами-деструкторами вуглеводнів нафти. «Біотехнологія. Наука. Освіта. Практика»: Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 11-13 листопада 2008), 98-99. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 56.** Figurka, O.M., Figurka, U.M., **Rusyn, I.B.**, & Novikov, V.P. (2008). Aerobic bioremediation measures for cleaning of soil from oil contamination. «The Coins 2008». International Conference for Students of Nature Sciences (11-15 March 2008, Vilnius), The book of abstracts, 61-62. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 57.** **Русин, І.Б.**, Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., & Новіков, В.П. (2008). Утилізація вуглеводнів нафти азотфіксуючими та целюлозоруйнуючими мікроорганізмами, виділеними з нафтозабруднених ґрунтів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів і аспірантів та молодих вчених (20-23 березня 2008, Київ), 101-102. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 58.** Фігурка, О., **Русин, І.**, & Новіков, В. (2008). Деструкція вуглеводнів нафти азотфіксуючими бактеріями. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез IV Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів (7-10 квітня 2008, Львів), 345. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та*

експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 59.** Фігурка, У., Русин, І., & Новіков, В. (2008). Участь целюлозоруйнуючих мікроорганізмів в біодеструкції вуглеводнів нафтозабруднених ґрунтів. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез IV Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів (7-10 квітня 2008, Львів), 346. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 60.** Русин, І.Б., Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., & Новіков, В.П. (2008). Участь азотфіксуючих та целюлозоруйнуючих мікроорганізмів в біодеструкції вуглеводнів нафтозабруднених ґрунтів. «Біологія: від молекули до біосфери»: Матеріали III Міжнародної конференції молодих науковців (18-21 листопада 2008, Харків), 459-460. ФОП Шаповалова Т.М., Харків. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 61.** Rusyn, I.B., Figurka, O.M., Figurka, U.M., Fedak, R.T., Perminova, I.M., Dzhura, N.M., Moroz, O.M., & Novikov, V.P. (2007). Recultivation of oil polluted soils by microorganisms and rough sedge. «Modern Problems of Microbiology and Biotechnology»: International scientific conference of young scientists and students (28-31 May 2007), Book of Abstracts, 108. Astroprint, Odesa. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 62.** Пермінова, І., Русин, І., Джура, Н., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Дріжджі і плісневі гриби нафтозабрудненого ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 357-358. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 63.** Фігурка, У., Русин, І., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Вплив нафтового забруднення на целюлозоруйнуючу мікрофлору ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007,

Львів), 376. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

- 64.** Фігурка, О., Русин, І., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Азотфіксуючі бактерії нафтозабрудненого ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 375. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*
- 65.** Федак, Р., Русин, І., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Анаеробна мікробіота нафтозабрудненого ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 373-374. СПОЛОМ, Львів. *(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)*

ЗМІСТ

Вступ.....	34
Перелік умовних позначень.....	46
Розділ 1. Основні біоелектричні принципи, загальна будова та перспективи рослинно-мікробних біосистем отримання біоелектрики	
1.1 Продукування біоелектрики рослинно-мікробними біосистемами.....	48
1.2 Електродні матеріали та їх конфігурації як важливий фактор біоелектропродуктивності біосистем	59
1.3 Субстрати рослинно-мікробних біосистем.....	71
1.4 Значення мікробних спільнот у функціонуванні рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики.....	80
1.5 Роль рослин у ефективності рослинно-мікробної біотехнології генерації біоелектрики.....	93
1.6 Вплив зовнішніх факторів на генерацію біоелектрики.....	114
1.7 Практичне застосування біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики.....	119
Висновки до розділу 1. Визначення основних напрямків досліджень.....	144
Список літератури до розділу 1.....	147
Розділ 2. Методика досліджень та умови експериментів	
2.1 Біологічні компоненти рослинно-мікробних біосистем.....	190
2.2 Розробка електродних систем для збору рослинно-мікробної біоелектрики в біосистемах	197
2.3 Умови проведення експериментів в лабораторних умовах та <i>in situ</i>	204

2.4	Визначення показників біоелектрики та обрахунки.....	215
2.5	Моніторинг метеорологічних факторів та фізико-хімічних чинників довкілля.....	217
2.6	Відбір проб ґрунту для хімічного аналізу та визначення коефіцієнту концентрацій.....	218
2.7	Рентгено-флюорисцентний аналіз складу ґрунту.....	219
2.8.	Підготовка біодобрива на основі сульфатвідновлюючих бактерій.....	221
2.9	Визначення висоти і росту рослин та накопичення листяно-стеблової і кореневої маси рослин.....	222
2.10	Статистична обробка результатів.....	222
	Список літератури до розділу 2.....	223

Розділ 3. Розробка структури біомодулів для отримання

	рослинно-мікробної біоелектрики.....	228
3.1	Дослідження різних матеріалів як електродів для отримання рослинно-мікробної біоелектрики.....	231
3.2	Полівінілхлорид-ізольовані мідні дроти у біосистемах.....	235
3.3	Розробка багатоелектродних біосистем отримання біоелектрики	238
3.4	Стекування багатоелектродних біосистем для збільшення ефективності отримання біоелектрики шляхом паралельно-послідовного підключення.....	242
3.5	Розробка компактних багатоелектродних біосистем для автономного живлення світлодіодів та метеостанцій в енергоефективних будинках.....	248
	Висновки до розділу 3.....	269
	Список літератури до розділу 3.....	272

Розділ 4. Оцінка біоелектропродуктивності природних екосистем

in situ

4.1 Біоелектрика екосистем лісів, заболочених територій та агроекосистем	282
4.2 Отримання біоелектрики у паркових зонах міст.....	301
4.3 Перспективи використання техногенно забруднених територій для отримання біоелектрики.....	305
Висновки до розділу 4.....	328
Список літератури до розділу 4.....	331

Розділ 5. Отримання біоелектрики біотехнологічними системами, базованими на *Alisma plantago-aquatica* всередині будівель.....

5.1 Селекція рослинної біоскладової для електробіотехнології закритих приміщень.....	348
5.2 Культивування <i>A. plantago-aquatica</i> в складі біосистем в приміщеннях на закритих балконах та терасах будинків	350
5.3 Бюджетність біосистеми з <i>A. plantago-aquatica</i>	354
5.4 Біоелектричні параметри біосистеми з <i>A. plantago-aquatica</i> . Генерація біоелектрики біосистемами в різних умовах.....	356
5.5 Час виходу біосистеми на середньорічні показники біоелектрики.Значення використання саджанців рослин	358
5.6 Електропродуктивність біосистем в залежності від розвитку рослин.....	361
5.7 Вплив температури та <i>Desulfovibrio sp.</i> на ефективність біосистем.....	361
Висновки до розділу 5	365
Література до розділу 5	367

Розділ 6. Біосистеми, базовані на <i>Festuca arundinaceae</i> як джерело біоелектрики та контейнерне озеленення в сучасних енергоефективних будівлях.....	374
6.1 Продукування біоелектрики біосистемою, базованою на <i>F. arundinacea</i> . Генерація біоелектрики в залежності від розвитку рослин	376
6.2 Вплив сезонних умов на отримання біоелектрики. Цілорічне функціонування біоелектричної системи з <i>F. arundinacea</i>	381
6.3 Особливості <i>F. arundinacea</i> як біокомпонента електробіотехнології	386
6.4 Перспективи біосистем з <i>F. arundinacea</i> , в будинках та їх бюджетність. Нові підходи до створення рослинно-мікробних біосистем.....	387
Висновки до розділу 6.....	392
Список літератури до розділу 6.....	394
Розділ 7. Перспективи біосистем з <i>Caltha palustris</i> на балконах і терасах енергоефективних будинків та <i>in situ</i>.....	401
7.1 Вплив вологи на генерацію біоелектрики біосистемами з <i>C. palustris</i> під час літніх місяців <i>in situ</i>	405
7.2 Біоелектричні параметри біосистем з <i>C. palustris</i> на терасах та балконах будинків. Вплив розвитку рослин та анелід <i>L. terrestris</i> на ефективність біосистем.....	409
7.3 Перспективи генерації біоелектрики біосистемами із <i>C. palustris</i> і <i>L. terrestris</i> в енергоефективних будинках та на заболочених ділянках <i>in situ</i>	406
Висновки до розділу 7.....	416
Література до розділу 7.....	418

Розділ 8. Біосистеми, базовані на мохах на зелених дахах енергоефективних будинків.....	423
8.1 Вплив температури на генерацію біоелектрики біотехнологічними системами з мохами.....	425
8.2 Вплив атмосферних опадів на функціонування біосистем з мохами на зелених дахах.....	428
8.3 Роль конфігурацій систем катодів та анодів в роботі біосистем з мохами	431
Висновки до розділу 8	435
Література до розділу 8.....	436
Розділ 9. Біотехнологічні системи, базовані на <i>Carex hirta</i> на зелених дахах енергоефективних будинків.....	441
9.1 Вплив температури та атмосферних опадів на продукування біоелектрики біосистемами з <i>C. hirta</i>	443
9.2 Роль конфігурацій систем електродів в роботі біосистем з <i>C.hirta</i>	448
9.3 Особливості генерації біоелектрики біотехнологічними системами з <i>C. hirta</i> на дахах на протязі року.....	450
9.4 Порівняння генерації біоелектрики та бюджету біосистем.....	453
Висновки до розділу 9.....	456
Література до розділу 9.....	459
Висновки.....	466
Додаткок А.....	469
Додаткок В.....	484

ВСТУП

Актуальність теми. Розробка альтернативних та екологічних енергоефективних біотехнологій, яким присвячена дисертаційна робота, є одним з найбільш актуальних завдань людства, що вже зіштовхнулося з катастрофічними наслідками експлуатації відновлювальних джерел енергії. Результатом використання традиційних джерел енергії є масштабне забруднення атмосфери, ґрунтів, водойм і продуктів харчування та глобальна зміна клімату. Кліматичні катаклізми: аномальна спека та затоплення, руйнівні урагани, лісові пожежі та посухи стали відчутні в кожному куточку планети в останні роки та поставили під загрозу здоров'я та життя людей. Так, за даними доповіді Міжурядової групи експертів ООН зі зміни клімату (The Intergovernmental Panel on Climate Change) підйом рівня води внаслідок глобального потепління призведе до затоплення місць проживання 280 млн. чоловік до 2100 року при підвищенні температури всього на 2-3°C. При нинішніх темпах зростання температури на планеті людство все частіше буде страждати від ураганів і повеней, а північні країни від надзвичайних, більше -50°градусних, морозів.

Забруднене середовище існування та надзвичайна кліматична ситуація, оголошена главою ООН в 2019 році зумовлюють потребу пошуку нових екологічно чистих енергоефективних технологій із скороченням викидів парникових газів. Кілька європейських країн та Японія законодавчо заявили про свої плани стати вуглець-нейтральними до 2050 року. Енергетичні технології і структура енергоспоживання в світі докорінно трансформуються. В рамках переходу на нову вуглець-нейтральну стратегію розвитку вагома роль надається озелененню, що визначається як важливий інструментарій боротьби, як з наслідками, так із причинами глобальної зміни клімату, а також, як ресурсозберігаючий чинник. В планах розвитку міст закладаються нові екологічні принципи із енергоефективними будинками, зокрема, із зеленими дахами на будівлях, а існуючі міста та агломерації підлягають зеленій модернізації. В

даному контексті розвиток інноваційного напрямку отримання зеленої, рослинно-мікробної біоелектрики в будинках і зелених дахах та природних екосистемах, що представлений в дисертаційній роботі, є *актуальним* та має велике *практичне значення*.

Біотехнологія рослинно-мікробної біоелектрики, або так звані рослинно-мікробні біосистеми є інноваційним багатообіцяючим та екологічним способом отримання біоелектрики. Вона полягає у внесенні електродних систем в товщу субстрату, де розвиваються рослини та відборі біоелектрики, яку продукують прикореневі електроактивні мікроорганізми, споживаючи екскретовані через коріння продукти фотосинтезу, продукти розкладу рослин та неорганічні сполуки субстрату. Дослідження отримання біоелектрики із зелених насаджень як різновиду альтернативної енергетики, тільки починає розвиватися. Основні роботи у вивченні біоелектрики рослин та асоційованих з ними мікроорганізмів, так званих рослинно-мікробних паливних елементів, беруть початок з 2008 року із експериментів по вивченню електропродуктивності заболочених екосистем: рисових полів науковими групами під керівництвом De Schamphelaire et al. і Kaku et al., та болотистих трав *Glyceria maxima* науковцями, очолюваними Strik D.P.V.T.V. У 2010 році було проведено декілька робіт з метою з'ясування можливості використання різних видів болотистих трав для отримання біоелектрики на зелених дахах Helder et al., 2010 та Timmers et al., 2010. Проте, було показано суттєве зниження ефективності генерації біоелектрики в зимовий період. Хоча теоретичні розрахунки, проведені науковою командою Strik et al. в 2011 році визначили рослинно-мікробну біотехнологію як високоперспективну: за умов її вдосконалення 100 м² рослинності з вмонтованими електродними системами здатні забезпечити енергопотреби цілого будинку, що споживає 2800 кВт*год/рік. В 2014 році в Нідерландах рослинно-мікробну біоелектрику вперше практично застосували для LED освітлення.

Від часу перших робіт, за останнє десятиліття, з метою вдосконалення біотехнології отримання рослинно-мікробної біоелектрики випробувано багато біосистем з різними електродними схемами, в своїй більшості вуглець-

базованими, різними середовищами та рослинами, але, не зважаючи на певний прогрес, на сьогоднішній момент залишається ряд невирішених проблем. Теоретично розрахований максимум потужності енергії біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики поки що недосягнутий. На теперішньому етапі розвитку біотехнології, рослинно-мікробні паливні елементи розробляються для живлення приладів низького енергоспоживання (Gomora-Hernandez et al., 2020, Apollon et al., 2021, Jawre et al., 2021).

Основні проблеми, що гальмують розвиток і широке застосування біотехнології біоелектрики рослинно-мікробних біосистем: недостатня ефективність, висока вартість матеріалів, сезонні втрати біоелектрики. Крім того, існуючі прототипи є досить громіздкими (Pamintuan et al., 2020, Arulmani et al., 2021, Apollon et al., 2022). Задача підвищення ефективності біоелектричних систем є складною і залежить від низки чинників: біологічних (розвитку кореневої системи, фотосинтетичної активності, ризодепозиту рослин, електрогенезу мікроорганізмів та активності інших ґрунтових біонтів), технічних (складу і структури субстрату, матеріалів електродів, схем їх розташування і з'єднань), а також впливу зовнішніх чинників (температури, вологості, освітлення).

У зв'язку із вищезазначеним розвиток інноваційних та екологічно безпечних біотехнологій рослинно-мікробної біоелектрики є актуальним і практично вагомим напрямком розвитку енергетики, зокрема, за критичних умов дефіциту електроенергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є частиною ініціативної науково-дослідної тематики кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська Політехніка» під керівництвом дисертанта: «Застосування біоремедіативних систем для техногенно забруднених ґрунтів та водойм», номер державної реєстрації 0114U001223, 2013 року та «Електро-біосистеми для отримання рослинно-мікробної біоелектрики», номер державної реєстрації 0120U100027, 2020 року.

Тема дисертації затверджена Вченою радою Національного університету «Львівська Політехніка», протокол № 66 від 27.10.2020 року і уточнена, протокол №84 від 24 травня 2022.

Мета роботи: розроблення нової екологічно безпечної біотехнології цілорічного отримання рослинно-мікробної біоелектрики в енергоефективних будинках та оцінка перспектив біоелектропродуктивності природних екосистем.

Для досягнення зазначеної мети у роботі було сформульовано наступні **завдання:**

1. Розробити нові біосистеми на основі рослин: *Alisma plantago-aquatica*, *Festuca arundinacea*, *Caltha palustris*, *Carex hirta*, *Hypnum cupressiforme*, *Polytrichum commune*, *Leucobryum glaucum*, *Ocimum basilicum*, *Helcine soleirolii* для отримання біоелектрики в енергоефективних будинках та зелених дахах;
2. Дослідити вплив різних видів рослин на генерацію біоелектрики;
3. Вивчити роль бактерій *Desulfovibrio* sp. та аннелід *Lumbricus terrestris* як активаторів електрогенезу біосистем з рослинами *A. plantago-aquatica* та *C. palustris*, відповідно;
4. Удосконалити структуру біомодулів рослинно-мікробної біосистеми задля підвищення ефективності;
5. Вивчити вплив атмосферних умов (температури та кількості опадів) на ефективність біосистем на зелених дахах;
6. Визначити ефективність розробленої рослинно-мікробної біосистеми для автономного живлення цифрових приладів;
7. Визначити біоелектричні параметри *in situ* біосистем у лісових масивах, заболочених луках, агроекосистемах, урбоекосистемах паркових і лісопаркових зон та на техногенно забруднених газонах вздовж автотрас.

Об'єктом дослідження є генерація біоелектрики рослинно-мікробними біосистемами за умов енергоефективних будинків: всередині і на дахах, а також, природних біотопів.

За умов енергоефективних будинків об'єктом досліджень була генерація біоелектрики біосистем з більше як 15 видами рослин: з водним подорожником *Alisma plantago-aquatica* L., кострицею очеретяною *Festuca arundinacea* Schreb., калюжницею болотяною *Caltha palustris* L., осокою шершаволистою *Carex hirta* L. та мохами кипарисовим лишайником *Hypnum cupressiforme* Hedw., зозулиним льоном *Polytrichum commune* Hedw., левкобрієм сизим *Leucobryum glaucum*, ряскою малою *Lemna minor*, а також, з кімнатними рослинами: солейролією гелксини *Helcine soleirolii*, базиліком кімнатним *Ocimum basilicum*, плющем звичайним *Hedera helix* L., кімнатною пальмою Хамедорея вишуканою *Chamaedorea elegans* Mart. (1830), спатіфілумом ланцетолистим *Spathiphyllum lanceifolium* (Jacq.) Schott, клівією благородною *Clivia nobilis* Lindl., валоттою кіноварною *Vallota miniata* Lindl., товстянкою яйцеподібною *Crassula ovata* (Miller) Druce (1917), диффенбахією плямистою *Dieffenbachia seguine* (Jacq.) Schott.

В експериментах *in situ* об'єктом дослідження була генерація біоелектрики біотопів 45-ти видів рослин, найбільш широко представлених на заході України. Біоелектрика генерувалася при взаємодії угруповання рослин і їх ризосферних мікроорганізмів (фітомікробіоценозів). Об'єктом дослідження *in situ* виступала біоелектрика природних біотопів лісових екосистем, екосистем заболочених луків, агроекосистем фруктових садів і кущів та сільськогосподарських культур, урбоекосистем парків та лісопарків, техногенно забруднених територій вздовж автотрас міста.

В лісових екосистемах досліджувалась генерація біоелектрики фітомікробіоценозами, сформованими переважаними в лісах України видами рослин, такими як сосни лісової *Pinus silvestris* L., дуба звичайного *Quercus robur* L., а також, бука лісового *Fagus sylvatica* L., берези повислої *Betula pendula* Roth., вільхи чорної *Alnus glutinosa* (L.) Gaerth. та граба звичайного *Carpinus betulus* L.

В екосистемах заболочених луків вивчали генерацію біоелектрики фітомікробіоценозів за участю осоки шершавої *Carex hirta* L., осоки

трясучковидної *Carex brizoides* L., куги озерної *Scirpus lacustris* L., тонконога болотяного *Poa palustris* L. та калюжниці болотяної *Caltha palustris* L.

Об'єктом досліджень в агроєкосистемах була генерація біоелектрики типових фітомікробоценозів фруктових садів, таких як плодових дерев: вишні звичайної *Prunus cerasus* L., сливи домашньої *Prunus domestica* L., яблуні домашньої *Malus domestica* Borkh., груші звичайної *Pyrus communis* L., горіха волоського *Juglans regia* L.; кущових видів: смородини чорної *Ribes nigrum* L., порічок червоних *Ribes rubrum* L., малини звичайної *Rubus idaeus* L., агруса звичайного *Ribes uva-crispa* L., калини звичайної *Viburnum opulus* L., дерев'янистої ліани винограду звичайного *Vitis vinifera* L., а також, однорічних низькорослих сільськогосподарських культур, таких як цибулі городньої *Allium cepa* L., петрушки кучерявої *Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss, моркви посівної *Daucus carota* subsp. *sativus*, буряка столового *Beta vulgaris* L., капусти городньої *Brassica oleracea* L., кабачка звичайного *Cucurbita pepo* var. *giraumontia*, гарбуза звичайного *Cucurbita pepo* L., так і високорослих огірка звичайного *Cucumis sativus* L., перця овочевого *Capsicum annuum* L. та кукурудзи цукрової *Zea mays* L.

Об'єктом досліджень у біотопах урбоекосистем була генерація біоелектрики фітомікробоценозів поширених газонних міських трав: райграсу пасовищного *Lolium perenne* L., костриці очеретяної *Festuca arundinacea* Schreb., тонконога лугового *Poa pratensis* L. (1753) та найбільш широко представлених у паркових екосистемах м. Львова та України фітомікробоценозів видів дерев: клена білого *Acer pseudoplatanus* L., граба звичайного *Carpinus betulus* L., ясена пухнастого *Fraxinus pubescens* L., бука лісового *Fagus sylvatica* L., в'яза гладкого *Ulmus laevis* Pall., гіркокаштану *Aesculus hippocastanum* L., липи серцеволистої *Tilia cordata* Mill., берези повислої *Betula pendula* Roth., тополі чорної *Populus nigra* L. та в'яза граболистого *Ulmus carpinifolia* Gled.

Предметом дослідження є біоелектричні параметри біосистем за різних чинників довкілля (температури та кількості опадів), біологічних (виду рослин, їх морфологічних параметрів та процесу розвитку рослин, впливу мікроорганізмів і

аннелід) та технологічних (матеріалів, способів підключення та конфігурацій електродних систем).

Методи дослідження. Для визначення впливу розвитку рослин і її морфологічних параметрів на генерацію біоелектрики екосистем, проводилося біометричне визначення росту рослин та визначення накопичення кореневої та листяно-стеблової маси біометричними та гравіметричними методами. В процесі вивчення впливу бактерій на генерацію біоелектрики використовувалися фотометричні методи. Для вивчення біоелектропродуктивності сконструйованих біосистем використовувалися методи вольтамперометрії за допомогою яких проводився моніторинг біоелектричного потенціалу та сили струму при короткотривалому та довготривалому застосуванні зовнішніх резисторів та без них. Для вивчення впливу фізико-хімічних чинників довкілля на біоелектричні параметри природних та сконструйованих екосистем проводився їх моніторинг шляхом потенціокондуктометричного вимірювання вологості ґрунту і рН субстрату, фотометричного визначення освітлення дослідної ділянки та рентгенофлюорисцентного аналізу хімічного складу ґрунту. Для дослідження впливу метеорологічних факторів на ефективність біосистем та біоелектричні параметри природних екосистем застосовувався аналіз метеорологічних архівних даних добових температур та кількості опадів в конкретному районі проведення експерименту. Всі отримані експериментальні дані проходили статистичну обробку.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше запропоновано нові біотехнологічні рішення задля отримання рослинно-мікробної біоелектрики та оцінки перспектив природних екосистем лісів та луків, агроекосистем, урбоекосистем і техногенно забруднених територій як джерел біоелектрики.

Вперше розроблені біосистеми на основі рослин *A. plantago-aquatica*, *F. arundinacea*, *C. palustris*, *O. basilicum*, *H. soleirolii* та *C. hirta*, *H. cupressiforme*, *P. commune*, *L. glaucum* для генерації біоелектрики в енергоефективних будинках та зелених дахах.

Вперше показано вплив бактерій *Desulfovibrio* sp. та анелід *L. terrestris* як біологічних енхансерів генерації біоелектрики біосистем з рослинами *A. plantago-aquatica* та *C. palustris*, які підвищували електричні показники біосистеми до 32.8% та 14.3%, відповідно.

Вперше розроблено біотехнології на основі морозостійких рослин: мохах та осоці *C. hirta* із стабільними біоелектричними параметрами після зимового періоду для використання на зелених дахах.

Вперше розроблений біоелектричний модуль на основі нової, економічно вигідної пари електродів: графітових катодів (відходів електротранспорту) та перфорованих оцинкованих сталевих анодів для отримання біоелектрики у поверхневих та глибинних шарах ґрунту.

Вперше показано сукупний вплив на біоелектричні параметри зміни міжелектродної відстані і паралельно-послідовного з'єднання 2–3-х компактних багатоелектродних рослинно-мікробних біомодулів для досягнення автономного енергоживлення світлодіодів, цифрової кімнатної метеостанції, цифрового термометра/гігрометра (в режимі реального часу).

Вперше показано потенціал природних екосистем лісів, заболочених луків, агроекосистем, урбоекосистем паркових зон та газонів вздовж автомагістралей за кліматичних умов заходу України як джерела поновлюваної біоелектрики. Виявлено резистентність продуктивності біоелектрики біосистемами зелених смуг вздовж автотрас до забруднення важкими металами.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена біотехнологія є основою для автономних датчиків і систем моніторингу екосистем, біоіндикаторів їх стану та LED освітлення як для енергоефективних будинків, так і для використання *in situ*. Вперше досягнуто прогресу у зменшенні розмірів та кількості модулів біосистем при збереженні виходу біоелектрики.

Біотехнології в землях сільськогосподарського призначення можуть служити єдиним джерелом енергії для датчиків вологості ґрунту, інноваційних систем моніторингу за складом ґрунту і ростом рослин та автономних систем поливу. В

містах рослинно-мікробна біоелектрика може забезпечувати LED освітлення паркових територій та дитячих майданчиків, живити придорожнє освітлення.

Застосування прямих і декоративних рослин в складі запропонованої біотехнології надає їй подвійне практичне значення: як поновлювального джерела електрики, а також для декорування приміщень або для кулінарії.

Використання рослинно-мікробних біосистем замість батарейок для живлення приладів дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів на виробництво батарейок та нівелювати проблему їх утилізації. Впровадження біосистем в енергоефективних будинках та природних екосистемах має істотне значення для зменшення емісії парникових газів через зниження експлуатації традиційних відновлювальних джерел енергії.

Практичне значення результатів засвідчене трьома патентами України на корисну модель. Біосистеми, розроблені в дисертаційній роботі, **впроваджені при будівництві енергоефективних будинків для LED освітлення житлових комплексів та автономного енергоживлення цифрових термометрів та гігрометрів** ТЗОВ “ГАЛИЦЬКА БУДІВЕЛЬНА ГІЛЬДІЯ“, зокрема, у житловому комплексі Park Tower у м. Львові та в житловому комплексі ПАРУС City у м. Львові.

Розроблені біотехнології **застосовані в наукових проектах європейських та американських університетів та наукових інститутів**, зокрема, відділу хімії та біомолекулярних наук Кларксон Університету (Потсдам, НьюЙорк, **США**), Національного технологічного Інституту Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL) і Tecnológico Nacional de México (TecNM) (El Llano Aguascalientes, **Мексика**), Інституту Агрофізики Польської Академії Наук (Люблін, **Польща**), Інституту макромолекулярної хімії Академії Наук Чеської Республіки (Прага, **Чехія**).

Результати дисертаційної роботи були використані у навчальному процесі в лекційних курсах з біотехнології та біології для студентів екологів НУ «Львівська Політехніка» та можуть бути використані у курсах з прикладної мікробіології та

біотехнології для студентів біологічних і технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

Особистий внесок здобувача. Дисертантці належить ідея досліджень, планування напрямків досліджень. Всі експерименти виконувались здобувачем особисто або за безпосередньої участі із співавторами статей. Визначення вмісту важких металів у пробах було проведено у співробітниці з старшим викладачем кафедри екологічної безпеки та прородоохоронної діяльності Національного університету «Львівська Політехніка» Пашуком А.В. Формування робочих гіпотез та частина підрахунків здійснювалися разом із співавторами наукових статей та патентів і науковим консультантом. Авторкою проведено пошук наукової літератури та опрацювання літературних даних за темою дисертаційної роботи, а також, здійснено статистичну обробку отриманих результатів, аналіз даних та їх інтерпретацію, співставлення з даними літератури та формулювання висновків.

Апробація результатів дисертації. Дисертаційну роботу апробовано на фаховому семінарі кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська Політехніка», протокол № 1 від 31.05.2022 року і кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» 5.04.2023 року. Результати досліджень та основні положення дисертації були представлені на наукових конференціях, конгресах та з'їздах: I міжнародній науково-практичній конференції «Overcoming environmental risks and threats for the environment in emergency conditions-2022» (Полтава, 2022), Міжнародній науковій конференції «Challenges, threats and developments in biology, agriculture, ecology, geography, geology and chemistry» (Lublin, Poland, 2021); XXII міжнародній науково-практичній онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2021); «Aktualne problemy ochrony srodowiska Ukrainsko-Polskiej strefy przygranicznej»: Miedzynarodova konferencja naukowa i praktyczna (23-25 October 2019, Lviv); «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application»: International

Scientific and Practical Conference (October 20-22, 2014, Dubai, UAE); «Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Oceans Countries»: 1st International Academic Congress (25 October 2014, Tokyo, Japan); V Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (23-26 вересня 2015, Вінниця); «Молодь і поступ біології»: XI Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів (20-23 квітня 2015, Львів); «Environment protection. Energy saving. Sustainable environmental management»: 3-ому міжнародному конгресі (17-19 вересня 2014, Львів); «Біологія: від молекули до біосфери»: IX Міжнародній науковій конференції молодих науковців (Харків, 18-20 листопада 2014); «Молодь і поступ біології»: X Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів (8-11 квітня 2014, Львів); «Біотехнологія: звершення та надії»: III Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених (15-16 травня 2014, Київ); «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансованого користування»: II Міжнародній науковій конференції студентів, магістрантів, аспірантів та молодих вчених (5-6 грудня 2013, Харків); «Біологія: від молекули до біосфери»: VIII Міжнародній конференції молодих учених (3-6 грудня 2013, Харків); «Біологія: від молекули до біосфери»: VI Міжнародній конференції молодих науковців (22-25 листопада 2011, Харків); X Міжнародній науково-практичній конференції «Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання» (19-21 травня 2011, Львів); «Молодь і поступ біології»: VI Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів (21-24 вересня 2010, Львів); «Новітні досягнення біотехнології»: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (21-22 жовтня 2010, Київ); «Молодь і поступ біології»: V Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів (12-15 травня 2009, Львів); «Біотехнологія. Наука. Освіта. Практика»: IV Міжнародній науково-практичній конференції (Дніпропетровськ, 11-13 листопада 2008); «The Coins 2008». International Conference for Students of Nature Sciences (11-15 March 2008, Vilnius); Міжнародній науково-практичній конференції студентів і аспірантів та молодих вчених (20-23 березня 2008, Київ); «Молодь і поступ біології»: IV

Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів (7-10 квітня 2008, Львів); «Біологія: від молекули до біосфери»: III Міжнародній конференції молодих науковців (18-21 листопада 2008, Харків); «Modern Problems of Microbiology and Biotechnology»: International scientific conference of young scientists and students (28-31 May 2007, Odessa); «Молодь та поступ біології»: III Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів (23-27 квітня 2007, Львів).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено у 65 наукових працях, з яких 28 наукові публікації, які розкривають основний зміст дисертації, до них належать 1 розділ монографії та 27 наукових статей: **10** статей у виданнях, включених до наукометричних баз **Scopus та Web of Science** (2 статті Q1, 1 стаття Q2, 2 статті Q3, 5 статей Q4) (в тому числі 7 статей у виданнях інших держав: Нідерланд, Великобританії, США, Ірану, Угорщини, Польщі та Литви та 3 статті у фахових виданнях України), 15 статей у інших наукових фахових виданнях України та 2 статті в наукових періодичних виданнях України, а також, 3 патенти України на корисну модель та посібник і 33 тези доповідей у матеріалах наукових з'їздів, міжнародних і вітчизняних конференцій та конгресів.

Структура дисертації. Дисертація викладена на 491 сторінках друкованого тексту та включає вступ, огляд літератури, опис матеріалів і методів досліджень, 7 розділів результатів власних досліджень, висновки, список використаних літературних джерел, а також, додатки. Дисертація ілюстрована 18 таблицями та 118 рисунками.

Перелік умовних позначень

AEM – Anion Exchange Membrane, аніонообмінна мембрана

APS – Adenosine Phosphosulphate, аденозинфосфосульфат

ATP – Adenosine Triphosphate, аденозинтрифосфат

CAM – Crassulacean Acid Metabolism, толстянковий кислотний метаболізм

C3 – метаболічний шлях зв'язування вуглекислого газу, першим метаболітом якого є три вуглецева 3-фосфогліцерінова кислота

C4 – метаболічний шлях зв'язування вуглекислого газу, першим метаболітом якого є чотири вуглецева щавелевооцтова кислота

CEM – Cation Exchange Membrane, катіонообмінна мембрана

CW-MFC – Constructed Wetland Microbial Fuel Cell, модельовані болотисті мікробні паливні елементи

DET – Direct Electron Transfer, прямий електронний транспорт

EBS – Electro-biosystems, електро-біосистема

EET – Extracellular Electron Transfer, позаклітинне перенесення електронів

FME – Floating Macrophytic Ecosystem, плаваючі макрофітні екосистеми

fPMFC – Floating PMFC, плаваючий рослинно-мікробний паливний елемент

IET – Indirect Electron Transfer, непрямий електронний транспорт

in situ – дослідження на місці в польових умовах

IoT-WSN – Internet of Things, IoT, Wireless Sensor Networks, WSN, бездротові сенсорні мережі на базі технології Інтернет речей

LED – Light-Emitting Diode, світлодіод

LCD – Liquid Crystal Display, рідкокристалічний дисплей

MET – Mediated Electron Transfer, медіатор-опосередкований транспорт електронів

Moss-PMFC – мох-базований рослинно-мікробний паливний елемент

MFC – Microbial Fuel Cell, мікробний паливний елемент

OCV – Open Circuit Voltage, напруга відкритого кола

ORR – Oxygen Reduction Reaction, реакція відновлення кисню на катоді

PCR – Polymerase Chain Reaction, полімеразно-ланцюгова реакція

Pee Power MFC – урино-мікробний паливний елемент

PEM – Proton Exchange Membrane, протонообмінна мембрана

PF-MFC – Paddy-Field MFC, мікробний паливний елемент рисових полів

PGA – Plant Growth Area, площа, вкрита засадженими рослинами

PMFC – Plant Microbial Fuel Cell, рослинно-мікробний паливний елемент

rRNA – Ribosomal Ribonucleic Acid, рибосомальна рибонуклеїнова кислота

16S rRNA-аналіз – ідентифікаційний аналіз мікроорганізмів, базований на вивченні нуклеотидних послідовностей їх гену 16S рибосомальної РНК

SMFC – Sediment Microbial Fuel Cell, седиментний мікробний паливний елемент

tMFC – Terrestrial Microbial Fuel Cell, ґрунтовий мікробний паливний елемент

Розділ 1. Основні біоелектричні принципи, загальна будова та перспективи рослинно-мікробних біосистем отримання біоелектрики

1.1 Продукування біоелектрики рослинно-мікробними біосистемами

В зв'язку із надзвичайним кліматичним та екологічним станом, проголошеним Європарламентом в кінці 2019 року для обмеження загального підвищення температури повітря на рівні не вище 1.5°C Європейська Комісія закликає всі країни перейти на вуглець нейтральні технології до 2050 року, що вже стало пріоритетом багатьох європейських країн (European Parliament, 2019). Загрози і ризики для планети, забруднене середовище та глобальна зміна клімату, що супроводжують інтенсивну експлуатацію традиційних невідновлювальних джерел енергії, заставляють людство розробляти альтернативні джерела енергії. Вітрова, сонячна, гідроелектрична та геотермальна альтернативна енергетика незважаючи на свої переваги зменшення викидів CO₂ та інших токсичних сполук, мають ряд недоліків, які врівноважують ці переваги. Це трансформація ландшафту, географічні обмеження та енергоємні процеси для виробництва фотоелектричних панелей (Mohtasham, 2015; Bombelli et al., 2016; Nitorisravut & Regmi, 2017).

В той же час, рослинно-мікробна біоелектрика, інноваційний вид альтернативної енергетики, передбачає отримання біоелектрики без будь якої шкоди довкіллю, в процесі росту рослин в природних екосистемах чи створених людиною урбо- та агроекосистемах. Єдиним втручанням в довкілля в цьому випадку є інсталяція у ґрунт електродних систем. Додаткові зелені території чи збережені існуючі одночасно з встановленими біоелектричними системами є важливим інструментом у боротьбі із наслідками та самим явищем глобальної зміни клімату. Одночасно з отриманням біоелектрики присутні всі основні природоохоронні переваги озеленення: очищення повітря і/чи води, клімато-регуляція, протиерозійний ефект та рекреація чи вирощування їжі (рис. 1.1.1). Урбоекосистеми у вигляді екстенсивних та інтенсивних зелених дахів на будівлях

одночасно з отриманням біоелектрики дозволяють у великій мірі знизити витрати на обігрів та кондиціонування будинків та створити пасивний зелений будинок (Oberndorfer et al., 2009; Castleton et al., 2010). Водні і ґрунтові екосистеми застосовуються для отримання електрики і усунення поллютантів, PMFC на основі фіторемедативних рослин розробляються для очищення побутових та промислових стічних вод, ремедіації поллютантів із забруднених вод і ґрунтів (Venkata Mohan et al., 2011; Klaisongkram et al., 2015; Habibul et al., 2016; Moqsud et al., 2017; Wang et al., 2017; Saz et al., 2018; Shen et al., 2018; Oodally et al., 2019; Yang et al., 2019). PMFC, можуть бути використані як біосенсиори для визначення рівня вологи у ґрунті (Taría et al., 2017), смарт сенсори моніторингу за станом здоров'я рослин (Brunelli et al., 2016), рівня CO₂ та O₃ в середовищі в смарт містах (Ayala-Ruiz et al., 2019). Агроекосистеми, як наприклад, рисові поля (De Schamphelaire et al., 2008; Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010; Bombelli et al., 2013; Kouzuma et al., 2013; Moqsud et al., 2015; Ueoka et al., 2016; Sudirjo et al., 2019) чи екосистеми кулінарних рослин (Sophia and Sreeja, 2017; Pamintuan et al., 2018a; Pamintuan et al., 2018b) можуть одночасно слугувати і для отримання агрокультур, і для отримання енергії. Легкість експлуатації роблять рослинно-мікробну біоелектрику більш привабливою, ніж розглянуті розповсюджені альтернативні джерела енергії. Галузь тільки почала активно розвиватися, частка робіт присвячених PMFC є суттєво нижчою, ніж MFC (рис.1.1.2).

Ідея використання мікроорганізмів для отримання біоелектрики має більше як 100 річну історію. В 1910 році Майкл Кресс Поттер (Michael Cresse Potter), професор університету Дарем, Великобританія (Durham, UK) висловив думку про можливість мікроорганізмів для отримання електрики. Він показав здатність найбільш вивчених модельних мікроорганізмів: бактерій *Escherichia coli* та дріжджів *Saccharomyces* генерувати біоелектричний потенціал та струм при розкладі органічних сполук за допомогою платинових електродів (Potter, 1911). Це відкриття дозволило йому сконструювати перший мікробний паливний елемент (microbial fuel cell, MFC) (Ieropoulos et al., 2010; Arends et al., 2014). Наступна розробка мікробних енергетичних елементів була здійснена через два

десятиліття в 1931 році Барнет Коен (Barnet Cohen) в університеті Кембрідж, Великобританія (Cohen, 1931).

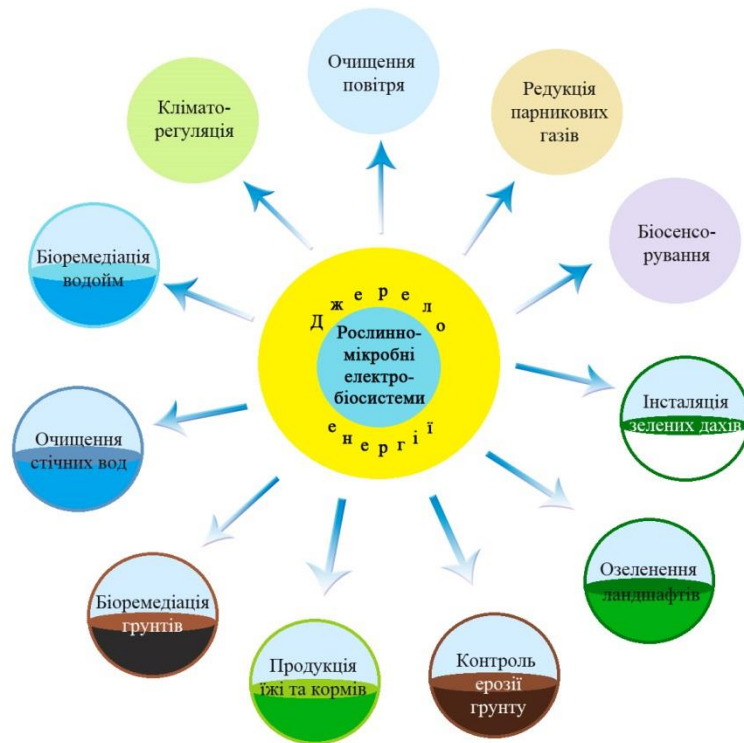


Рис 1.1.1 Схема застосування біотехнології рослинно-мікробних біосистем

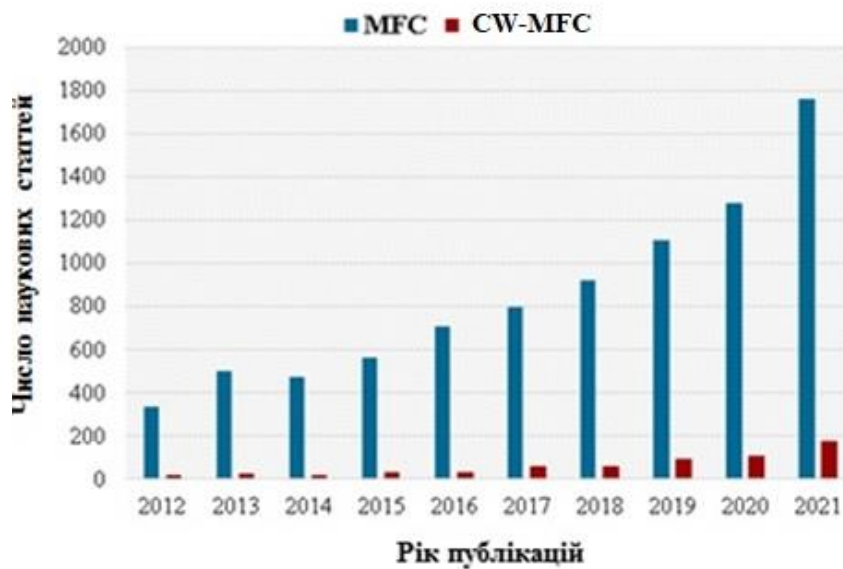


Рис. 1.1.2 Кількість публікацій галузі CW-MFC в порівнянні з MFC (Apollon et al., 2022)

У 1960-х роках ідея мікробних паливних елементів стала популярною, коли Національне управління з питань аеронавтики та космосу виявило зацікавленість перетворювати органічні відходи в електроенергію під час далеких космічних польотів (Shukla et al., 2004; Flimban et al., 2018). У цей період Девіс, Ярброуг і Рорбак (Davis, Yarbrough і Rohrback) продовжили подальший розвиток МФС, показавши можливість отримання біоелектрики з розчину глюкози, де розвиваються мікроорганізми та сконструювали перші біологічні паливні елементи, в якому *Clostridium butyricum* використовувався для отримання водню шляхом ферментації глюкози (Davis and Yarbrough, 1962; Rohrback et al., 1966). Цього ж року в Амстердамі, Нідерланди Вільямс показав, перспективи лігноцелюлози рисового лушпиння як субстрату для мікробних паливних елементів (Williams, 1966). В процесі вивчення біологічної корозії було показано поступлення електронів на твердий акцептор в результаті електрогенного дихання мікроорганізмів (Lewis, 1966). Дослідження анодного окислення вуглеводів продовжували в своїх роботах Яо (Yao et al., 1969) та Карубе (Karube et al., 1977) з Національного інституту сільськогосподарських наук, Нісігахара, Кітаку, Токіо Японія (National Institute of Agricultural Science, Nishigahara, Kitaku, Tokyo, Japan), які показали поступлення протонів на електроди при утилізації глюкози іммобілізованих клітин *C. butyricum*.

Багато робіт було присвячено дослідженню способів переносу електронів та протонів, вивільнених при розщепленні мікроорганізмами органічних сполук на електроди. У 1980-1990 роках наукова група Беннетто та Аллен з королівського коледжу у Лондоні, Великобританія (Kings college in London, UK) дослідила механізми перенесення електронів з мікробної клітини на електрод за допомогою медіаторних систем та розробила ряд мікробних паливних елементів (Bennetto, 1984; Bennetto et al., 1984; Allen & Bennetto, 1993). Хаберманн і Поммер (Habermann & Pommer, 1991) вперше повідомили, що електроактивні бактерії можуть продукувати природні молекули-переносчики для трансферу електронів, позаклітинні цитохроми та продемонстрували першу МФС систему, що працювала на органічних відходах курячому посліді, тваринному гної та

листяному опаді (Ieropoulos et al., 2010; Arends et al., 2014). Бонд і Лавлі (Bond & Lovley, 2003) з університетів Міннесоти та Массачусетс, США (University of Minnesota, University of Massachusetts, USA) показали здатність бактерій роду *Geobacter sulfurreducens* тривало адгезуватися на графітових електродах та окислюючи органічні сполуки, переносити електрони на електроди і продукувати біоелектрику. Горбий та інші (Gorby et al., 2006) із Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії, Річленд, США (Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA) показали можливість електронного трансферу через струмопровідні нанотрубки, які в процесі розвитку створюють *Shewanella oneidensis* та інші мікроорганізми. А Чанг та інші (Chang et al., 2006) з Корейського інституту науки і технології (Korean Institute of science and technology) показали перенос електронів від бактерій на аноди без участі будь-яких молекул медіаторів.

Перше століття досліджень використання мікроорганізмів для отримання біоелектрики шляхом створення MFC стосувалися електро-активної властивості суто мікроорганізмів при їх розвитку на різних органічних субстратах, відходах та електродах без участі живих рослин. Суть мікробних паливних клітин полягає в перетворенні електрохімічного потенціалу реакції водню та кисню в електричну енергію в процесі метаболізму мікроорганізмів, коли джерелом електронів та протонів є самі реакції мікробного обміну при утилізації поданих зовні субстратів. Біотехнологія застосування рослин та одночасно мікроорганізмів для отримання біоелектрики є різновидом мікробних паливних елементів і її називають рослинно-мікробні паливні елементи (plant microbial fuel cell, PMFC). Рослинно-мікробна біоелектрика є досить молодою галуззю науки, яка починає свій відлік з 2008 року. Ідея використання живих рослин для отримання мікробної біоелектрики належить Девіду Стріку та іншим з Вагенінгенського університету, Нідерланди (Wageningen University) (Strik et al., 2008). Електро-біотехнологія PMFC включає такі мультидисциплінарні галузі наук, як біологічні, і, зокрема мікробіологію та фізіологію рослин, так і різні технічні галузі, електрохімію тощо (Nitisoravut & Regmi, 2017) (табл. 1.1). Електро-біотехнологія PMFC поєднує

біотичні та абіотичні компоненти, що взаємозв'язані задля отримання біоелектрики та збереження навколишнього середовища (Nitorisavut & Regmi, 2017).

Таблиця 1.1 Мультидисциплінарні галузі наук, включені в біотехнологію рослинно-мікробної біоелектрики (за Nitorisavut & Regmi, 2017)

Дисципліна	Завдання	Мета
Фізіологія рослин	На основі фізіології та морфології вибір рослин як оптимального біологічного компоненту електробіотехнології	Селекція стійкої рослини з потужним ризодепозитом
Мікробіологія	Дослідження мікробних штамів, біологічних компонентів електробіотехнології в консорціумі ризосфера-грунт	Високоадаптовані електроактивні мікроби / електрогени
Хімічна інженерія	Селекція електродних матеріалів, технологічного компоненту електробіотехнології	Економічна, високопродуктивна, нетоксична конфігурація
Електротехніка	Вибір комбінації електродів та укладання окремих електросистем при масштабуванні	Комбінація окремих електро-біосистем для максимізації вихідної потужності
Екологічна інженерія	Нові підходи до боротьби з глобальною зміною клімату та забрудненням середовища	Зниження викидів CO ₂ та токсичних речовин, очищення повітря та забруднених територій

Суть технології рослинно-мікробної біоелектрики є використання органічних продуктів фотосинтезу живих рослин (фотосинтетантів), що виділяються кореневою системою рослин та листяного/кореневого опаду і органічних та неорганічних компонентів субстрату для розвитку електро-активних ризосферних мікроорганізмів, які утилізуючи їх виділяють електрони і протони, що поступають на електроди, поміщені в області кореневої системи рослин (Strik et al., 2008) (рис. 1.1.3).

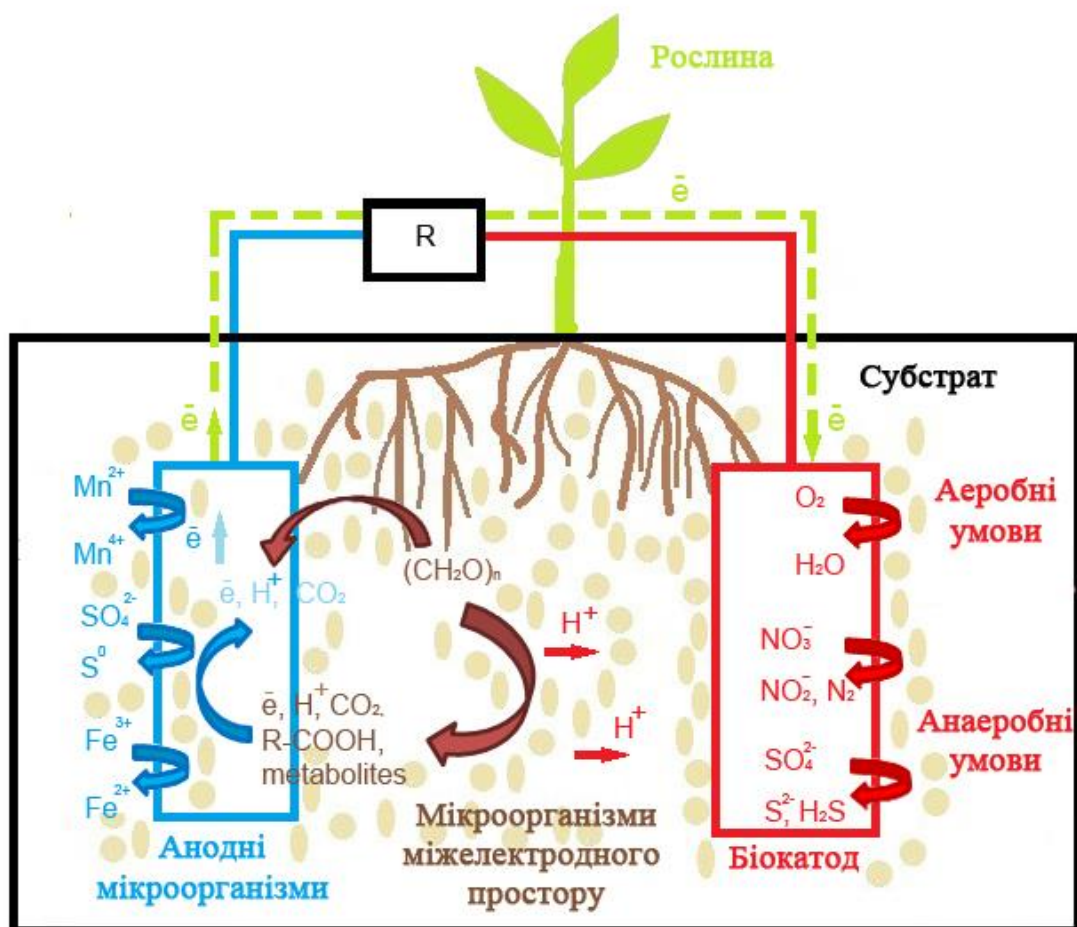


Рис. 1.1.3 Загальний принцип функціонування рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики

(за Strik, 2008 та Santoro et al., 2017).

Рослини конвертують сонячну енергію в енергію хімічних зв'язків аденозинтрифосфату (АТФ), яку використовують для синтезу органічних сполук (Rusyn, 2016). 40% синтезованих сполук рослина використовує для своїх потреб,

а решта, до 60% фотосинтетантів поступає в ризосферу (Lynch & Whipps, 1990; Helder et al., 2013a; Nitorisavut & Regmi, 2017), формуючи ризодепозит. Рослинний опад та відмерле коріння є другим важливим джерелом органічних речовин для мікробної популяції, присутньої в ґрунті (Timmers et al., 2012; Dai et al., 2015). А також, сам субстрат є ще одним донором електронів для ґрунтових мікроорганізмів (Deng et al., 2012). Електрони генеруються мікроорганізмами в процесі аеробного і анаеробного дихання та мікробного окислення простих і складних вуглеводів та органічних кислот рослин (Strik et al., 2008, De Schamphelaire et al., 2008), а також, присутніх у ґрунті гумінових кислот, заліза (II), сульфуру та сполук сульфуру до сульфату, амонію до нітриту чи нітрату, конверсією карбонату до органічних кислот з подальшим метаболізмом із генерацією електронів (Deng et al., 2012). Якщо електроди в MFC поміщають у штучно, зовні внесені комплекси органічних сполук, то в PMFC в область електродів поміщається коріння живих рослин. Мікробна популяція, присутня в ґрунті довкола ризосфери, розщеплює органічні та неорганічні сполуки з утворенням електронів та протонів в процесі свого метаболізму. Електробіотехнологія базується на екзоелектрогенній властивості мікроорганізмів віддавати в середовище генеровані електрони при окисленні органічних і неорганічних субстратів, які надходять до електропровідних матеріалів електродів (Bombelli et al., 2016).

Передача електронів з клітин на електроди, тобто, позаклітинний електронний транспорт (Extracellular Electron Transfer, EET) відбувається, як через непрямі механізми електронного трансферу (Indirect Electron Transfer, IET) (Debabov, 2008; Lovley, 2008; Rosenbaum and Schroder, 2010; Pinto, 2016), такі як мембрано-зв'язані медіатори (Delaney et al., 1984; Roller et al., 1984; Rabaey & Verstraete, 2005; Rabaey et al., 2007; Schroder, 2007; Tanaka et al., 2018), чи позаклітинні немедіаторні молекули-човники (Hubenova and Mitov, 2015) або/і через прямі механізми електронного трансферу (Direct Electron Transfer, DET), опосередковані через одночасний безпосередній контакт мікроорганізма та

електрода (Myers & Myers, 2000; Reguera et al., 2005; Pirkadian et al., 2014) (рис. 1.1.4).

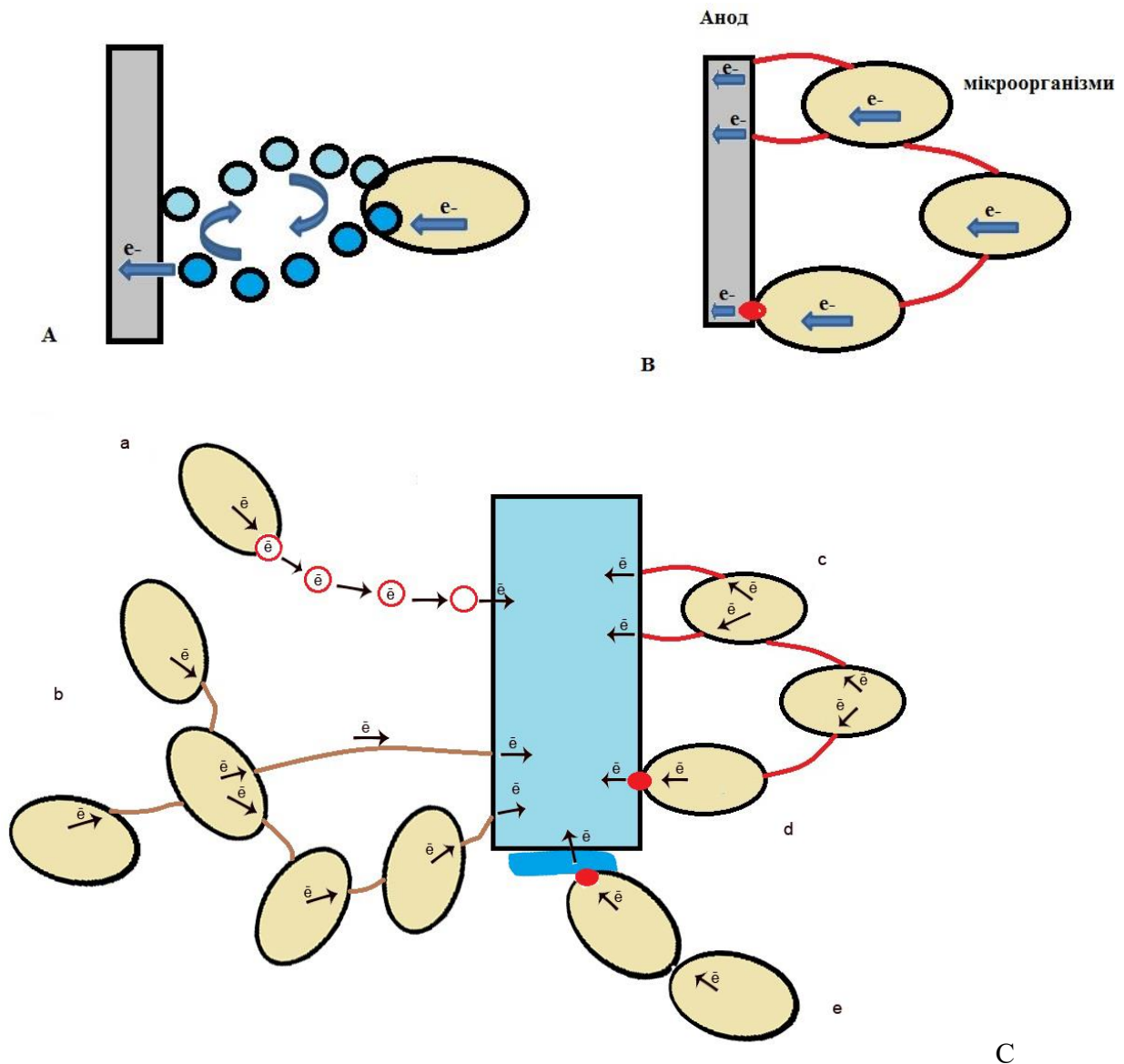


Рис. 1.1.4 Схема способів транспортування електронів від клітин мікроорганізмів до аноду: (A) – непрямий транспорт електронів через молекули-медіатори або ферментативні процеси, IET; (B) – прямий транспорт електронів через синтезовані мікроорганізмами кондуктивні пілі чи прямий контакт медіатора мембрани мікроорганізма з поверхнею електроду, DET; (C) (a) опосередкований екзогенними або ендогенними електронними шатлами та прямий електронний трансфер (b) через провідні нанофіламенти, (c) через нанодоти, (d) через мембранні цитохроми клітини, (e) через абіотичні кондуктивні мінерали

За допомогою скануючої тунельної мікроскопії Горбий та інші (Gorby et al., 2006) продемонстрували електропровідність бактеріальних наноутворів (DET), а Ель-Наггар та інші (El-Naggar et al., 2010) заміряли швидкість передач електронів по них. Дослідження Танака та інш. (Tanaka et al., 2018) виявили, що цитохромами-медіаторами переносчиками електронів володіє значна кількість мікроорганізмів, в тому числі, сульфатредуючі. Електрони, що виділяються після мікробного окислення субстрату DET- та IET-механізмами переносяться на анод. Після чого залишають анод і проходять через зовнішній електричний ланцюг, перш ніж дістатися до катода для виробництва біоелектрики (Flimban et al., 2018). Нарешті, ці електрони реагують з протонами та киснем на катоді і у разі реакції відновлення кисню, утворюють воду як кінцевий та чистий продукт та електричну енергію (Flimban et al., 2018) (рис. 1.1.4). Якщо в середовищі присутні нітрат- чи сульфат-іони бактерії редукують їх до сірки чи сірко-водню та нітриту чи нітрогену в процесі денітрифікації (Santoro et al., 2017). Таким чином біоелектрика генерується через окисно-відновний потенціал між двома електродами (Benetto, 1990).

В останнє десятиліття галузь рослинно-мікробної біоелектрики стрімко розвивається. З часу виникнення технології вона досягла великого прогресу, продуктивність зросла в десятки раз, проте теоретичний максимум технології поки що не досягнутий. На теперішньому етапі PMFC можуть енергозабезпечувати прилади низького енергоспоживання (Brunelli et al., 2016; Bombelli et al., 2016; Schievano et al., 2017; Piyare et al., 2017; Rossi et al., 2017; Ayala-Ruiz et al., 2019; de la Rosa et al., 2019; Gomora-Hernandez et al., 2020). Проте за розрахунками нідерландських науковців теоретичним максимумом рослинно-мікробної електро-біотехнології є повне енергозабезпечення цілих оселищ, який можна буде досягнути за умови вдосконалення технології (Strik et al., 2011; Wetser, 2016). Для масштабного застосування електро-біотехнології PMFC, в тому числі для енергоємних потреб, потрібно вирішити її основні проблеми такі як недостатня енергоефективність, коштовність та сезонні втрати біоелектрики. Вартість 1m^2 гранулярного активованого вугілля анодів складає

42.15 EUR, катодної карбонової плівки 170 EUR, а колекторних золотих дротів 40 EUR, при цьому тотальна вартість всіх матеріалів 1 м² електро-біосистеми для зеленого даху становить 632 EUR (Timmers et al., 2012; Helder et al., 2013a). Пошук нових бюджетних та ефективних електродних матеріалів і розробка продуктивних схем має вагоме значення для розвитку електро-біотехнології PMFC. Сезонне зниження енергоефективності під час посух та зим є ще одною проблемою PMFC технології на теперішньому етапі розвитку: кілька місячна пауза в електропродуктивності лісових болотних електро-біосистем під час посушливого періоду (Dai et al., 2015) та вимерзання рослин *Spartina anglica* на зелених дахах під час зимового періоду (Helder et al., 2013b). Ще одним викликом є громіздкість електро-біосистем PMFC для енерго-забезпечення приладів. Задача підвищення ефективності екобіотехнології є складною, оскільки ефективність функціонування електро-біосистем залежить від множини факторів, як біологічних, і зокрема, фотосинтетичної активності рослин, росту рослин, формування їх ризодепозиту, розвитку кореневої системи, електрогенезу прикореневого мікробіому, синтрофних та конкурентних взаємовідносин між мікроорганізмами, впливу інших біонтів екосистеми, так і її технічних структурних компонентів, і зокрема, матеріалів електродів, схем їх розташування та з'єднань, складу і структури субстрату, а також, впливу зовнішніх факторів, температури, вологості, освітлення, особливо, при функціонуванні *in situ* (рис.1.1.5). Дослідження нових ефективних рослин і субстратів, випробування нових електродних матеріалів та їх схем та конфігурацій є основними інструментаріями вдосконалення електробіотехнології, над якими працюють біоелектротехнологи всього світу, були також обрані завданнями дисертаційної роботи, як і дослідження нових підходів оптимізації технології, таких як з'ясування ролі енхансерів в генерації біоелектрики: нітрогенфіксуючих сульфатредуючих бактерій як джерела медіаторів електронів позаклітинного трансферу та нематод як центрів мікробної активності біосистем.

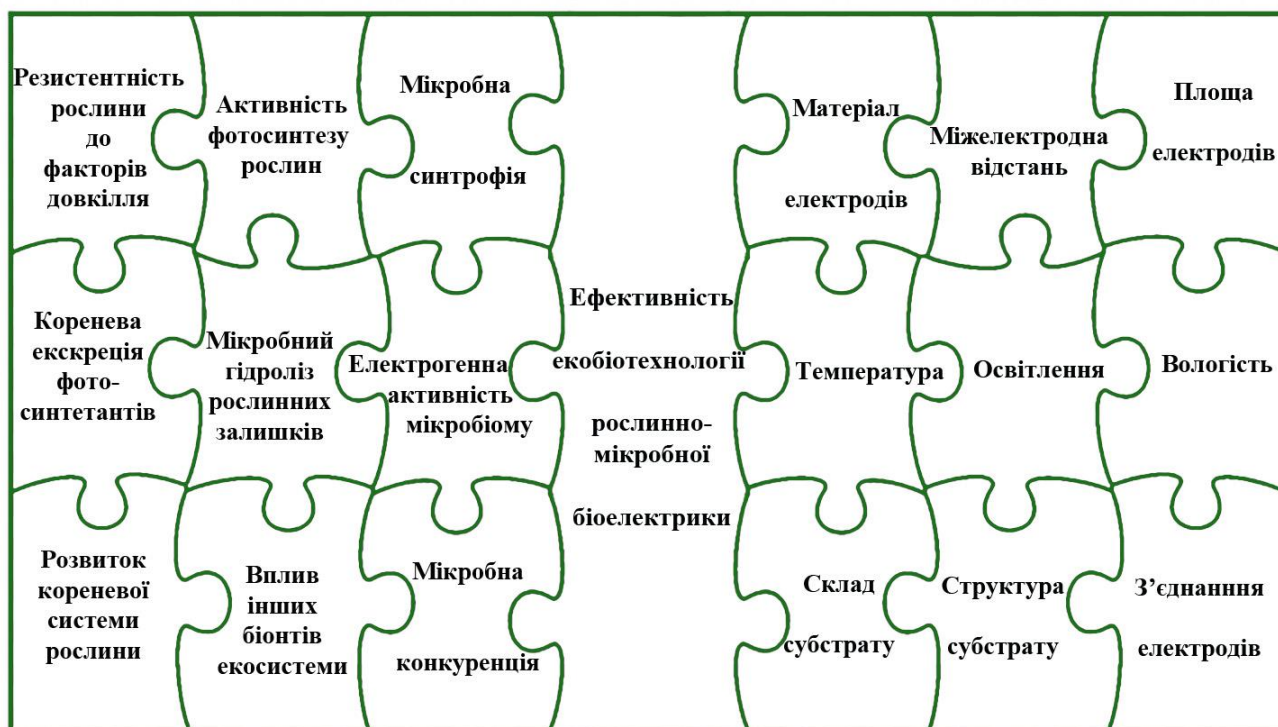


Рис. 1.1.5 Ефективність біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики залежить від множини біологічних, технологічних та зовнішніх факторів

1.2 Електродні матеріали та їх конфігурації як важливий фактор біоелектропродуктивності біосистем

Електродні матеріали біосистем є одним з визначальних факторів їх продуктивності на рівні з іншими факторами, такими як конфігурація системи, формування біоплівки на електродах, тип рослини, субстрату, температура та вологість середовища, освітлення (Behera & Varma, 2016; Pinto, 2016; Nitorisavut & Regmi, 2017). Вибір матеріалів та оптимальної конфігурації електродів може підвищувати продуктивність рослинно-мікробних електро-біосистем (Nitorisavut & Regmi, 2017). На виборі ефективної та бюджетної електродної пари для електробіотехнології фокусують свою увагу науковці всього світу.

Аноди на основі вуглецю сприяють ефективній адгезії бактерій та прискореному транспорту електронів. Графіт, що є кристалічною формою вуглецю зі структурою гібридизації sp^2 , завдяки високій стійкості та

електропровідності є багатообіцяючим матеріалом як біоелектрод (Kalathil and Pant, 2016). Як електроди застосовують різні форми графітів: палички, стружку, щітки, піну, графітові листи та тканини (рис. 1.2.1). Велика площа поверхні електрода забезпечує активний розвиток біоплівки, що в кінцевому результаті збільшує величину потужності отримуваної біоелектрики.

Як електродні матеріали в електро-біосистемах використовуються такі пари електродів, при яких густина потужності чи сили струму біосистем наступна (Nitisoravut & Regmi, 2017):

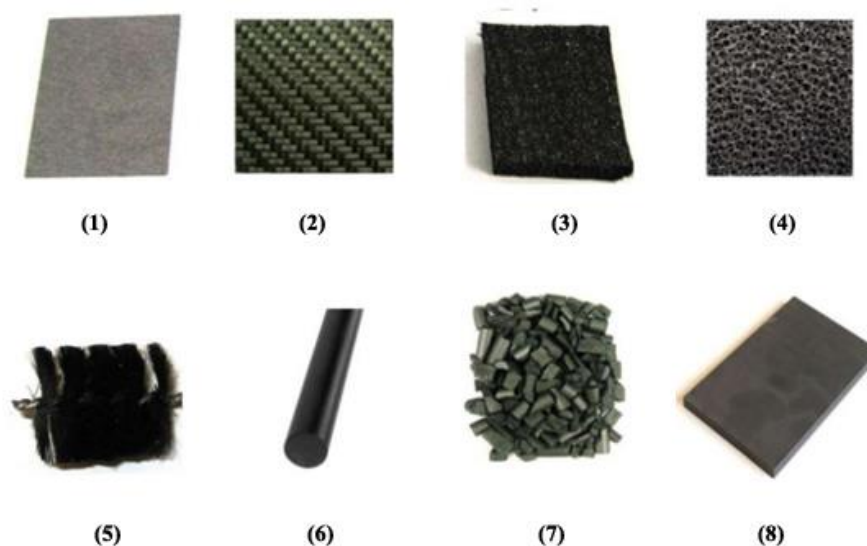


Рис. 1.2.1 Основні види карбон-базованих електродів (з Wei J. et al., 2011): 1 – карбоновий папір (Carbon paper); 2 – карбонова сітка (Carbon mesh); 3 – карбоновий фетр або карбонова тканина (Carbon felt); 4 – карбонова піна, сітчастий склоподібний карбон (Carbon foam, Reticulated vitrified carbon); 5 – карбонова волокниста щітка (Carbon fiber brush); 6 – графітова паличка (Graphite rod); 7 – графітові гранули (Graphite granules); 8 – графітова плита (Graphite plate).

- графітові палички/графітові гранули, 6.12 mW/PGA (Cervantes-Alcala et al., 2012);
- графітові палички/графітові волокна, 1.27 mA (Dai et al., 2015);
- графітові палички в графітових гранулах/графітова тканина (фетр), 22 mW/m² – 222 mW/m² в залежності від виду рослин (Helder et al., 2010);
- графітові гранули/графітова тканина (фетр), 67 mW/m² (Strik et al., 2008), 80 mW/m² (Timmers et al., 2012), 72 mW/m² (Arends et al., 2014), 110 mW/m² (Timmers et al., 2010);
- графітові гранули/карбонова тканина, 55 mW/m² (Habibul et al., 2016);
- графітова плита/графітова плита, 163 mW/m² (Chiranjeevi et al., 2012);
- графітова тканина/графітова тканина, 14.44 mW/m² (Takanezawa et al., 2010), 12 mW/membrane area (Timmers et al., 2013), 5.9 mW/m² (Klaisongkram & Holasut, 2014), 4.21 mW/m² (Yan et al., 2015, 2018), 8 mW/m² (Bombelli et al., 2016), 440 mW/m² (Helder et al., 2012);
- графітова тканина мультишар /графітова тканина моношар, 679 mW/Plant Growth Area (Wetser et al., 2015);
- графітова тканина/карбон в оболонці політетрафторетилену, 19 mW/m² (Kouzuma et al., 2013);
- графітовий диск/карбонова тканина, 18 mW/m² (Lu et al., 2015);
- графітовий диск/графітовий диск, 224.93 mA/m² (Venkata Mohan et al., 2011);
- карбонові гранули/карбонова тканина, 380 mW/m² (Hubenova & Mitov, 2012);
- карбонові волокна/нержавіюча сталь, 0.088 GJ ha⁻¹year⁻¹ та 980 GJ ha⁻¹year⁻¹ в залежності від типу рослин (Bombelli et al., 2013);

- карбонові волокна/карбонові волокна, 23 mW/m^2 (Moqsud et al., 2015), 15.38 mW/m^2 (Sarma & Mohanty, 2018);
- карбонова тканина/пориста карбонова тканина, 6.12 mW/m^2 (Oon et al., 2015);
- гранульоване активоване вугілля/нержавіюча сталь з вугіллям, 12.42 mW/m^2 (Liu et al., 2013);
- мідна спіраль/цинкова сітка, 3.5 mW/cm^2 (35000 mW/m^2) з одної рослини (de la Rosa et al., 2019).

Слід відмітити факт, що з одною і тою ж парою електродів значення біоелектрики можуть значно відрізнятись, що свідчить про велику вагу інших факторів в електропродуктивності біосистем. Отже, розроблені на теперішній момент електро-біосистеми для отримання рослинно-мікробної біоелектрики застосовують електродні системи на основі різних матеріалів, проте найбільш широко використовуваними матеріалами для електродів є вуглець-базовані: карбонові тканини та карбонові волокна, натомість, графіт і нержавіюча сталь є хорошою та маловивченою альтернативою.

Сторічна історія досліджень MFC, значні здобутки технології мікробних паливних елементів, прогрес та багаточисельні практичні впровадження технології обумовлюють важливість вивчення її досвіду використання електродних матеріалів для вдосконалення технології рослинно-мікробної біоелектрики, оскільки фундаметальні принципи функціонування MFC- та PMFC-технології є спільні. Перші MFC-використовувані електроди були платиновими, і зараз проводяться дослідження з платино-залізо(II)-фталоціанідними електродами (Harnisch et al., 2009). Проте найбільш широко використовуваними в MFC-технології є вуглецеві електродні матеріали (Pinto, 2016; Chen et al., 2019). З використанням 2D-вуглецевого паперу вдалося отримати густину потужності енергії MFC-систем є від 20 до 250 mW/m^2 , проте при одночасно високій вартості матеріалу електроду. 2D-волокнисті карбонові матеріали: вуглецева тканина, сітка, волокна, піна володіють специфічною збільшеною об'ємною поверхнею і дозволяють отримати ще вищі показники >

250 mW/m² та при цьому характеризуються дещо меншою ціною (Pinto, 2016). 3D-матеріали на основі вуглецю, такі як 3D-вуглецеві плівки чи вуглецеві волоконні щітки є ще більш перспективними та дозволяють отримати густину потужності від 50 до 1000 mW/m² (Pinto, 2016). Анод, розроблений на основі вуглецевої піни, отриманої з губкоподібної шкірки фрукту *Pomelo*, природного натурального матеріалу, дозволяє отримувати вищу густину струму, ніж при використанні графітової плівки та вуглецевої сітки завдяки зморшкуватій поверхні та високій пористості, що має значення для ефективного утворення біоплівки (Chen et al., 2012).

Графітові гранули, палички, щітки та тканини є ще одним типом вуглецевого анодного матеріалу в MFC-технології та мають перевагу для заповнення великого об'єму біля аноду і при цьому не перешкоджаючи циркуляції молекул (Pinto, 2016). Логан та інші (Logan et al., 2007) використовуючи як електрод графітову щітку в модельному MFC-міні-реакторі отримали густину потужності 2400 mW/m² (рис. 1.2.2).

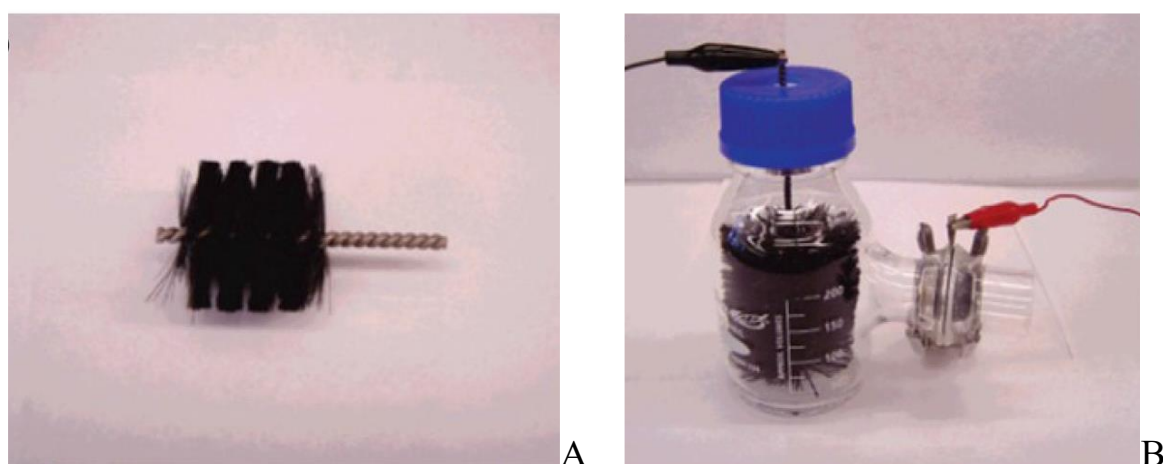


Рис. 1.2.2 Графітова волокниста щітка (А) як анод в MFC міні-реакторі (В), (Logan, et al., 2007).

Для підвищення ефективності анодного електрода через інтенсифікацію адгезії бактерій та утворення ними біоплівки, збільшення транспорту та передачі електронів вуглецеві аноди піддають хімічній та фізичній обробці. У 2007 році

Ченг і Логан здійснили високо-температурну обробку вуглецево-тканинного електроду аміаком протягом години. Хімічна амонійна модифікація електроду скоротила час акліматизації до початку генерування струму на 60% та збільшила максимальну потужність на 48% в порівнянні без обробки аміаком (Cheng & Logan, 2007). Застосування часткового окисленого вуглецево-тканинного біоаноду, отриманого шляхом ультрафіолетової обробки значно підвищує ефективність MFC порівняно з необробленим анодом, за рахунок посиленого утворення біоплівки та ЕЕТ (Cornejo et al., 2015; Kalathil et al., 2017). Часткове окислення вуглецевої тканини створює кисневмісні функціональні групи на поверхні біоаноду, що веде до збільшення їх гідрофільності та сприяє прикріпленню бактерій (Cornejo et al., 2015). Модифікація поверхні зарядженими групами $-COO^-$ сприяє адгезії бактерій та підвищує продуктивність MFC-технології (Pinto, 2016). Активація вуглецевого тканинного аноду шляхом обробки азотною кислотою та проста термічна обробка анодів на основі вуглецевої сітки і вуглецевого паперу приводять до підвищення електропродуктивності, ймовірно, через збільшення шорсткості поверхні для прикріплення бактерій в першому випадку та видаленню домішок, що перешкоджають електропровідності електродів у другому (Wang et al., 2009; Hidalgo et al., 2016). Просте замочування вуглецевої тканини у мурашиній кислоті підвищує ефективність біоаноду, створюючи більш чисту поверхню та зменшуючи вміст кисню (Liu et al., 2014). Загалом бактеріальна поверхня біоплівки є негативно зарядженою та гідрофільною (Kalathil & Pant, 2016). Тому модифікація біоанодів позитивно зарядженими групами та гідрофільними групами є перспективною стратегією, а позитивно заряджені біоанооди гідрофільної природи показують відмінні біоелектрокаталітичні показники (Guo et al., 2013). Отже, вуглець-базовані матеріали є багатообіцяючими та широковикористовуваними анодами, а перспективними стратегіями їх вдосконалення є створення синтетичних чи пошук природних 3D-матеріалів, їх хімічна та фізична модифікації, що збільшує об'ємну площу електроду, важливу для розвитку електро-активної біоплівки.

Метали як аноди є сумісними з MFC та PMFC-технологіями, якщо вони відповідають основній вимозі, низькій чутливості до корозії (Pinto, 2016). Через це залізо та мідь не підходять для застосувань технології, оскільки MFC та PMFC не обходиться без використання води. Навпаки, хімічно стійкі метали та дорогоцінні метали: платина, золото (Richter et al., 2008, Crittenden et al., 2006), титан (Heijne et al., 2008), нержавіюча сталь (Pocaznoi et al., 2012) можуть бути адаптовані як електрод анода (рис. 1.2.3). У 2008 році Дюма та інші показали невисоку ефективність пластинчастих електродів з нержавіючої сталі порівняно з

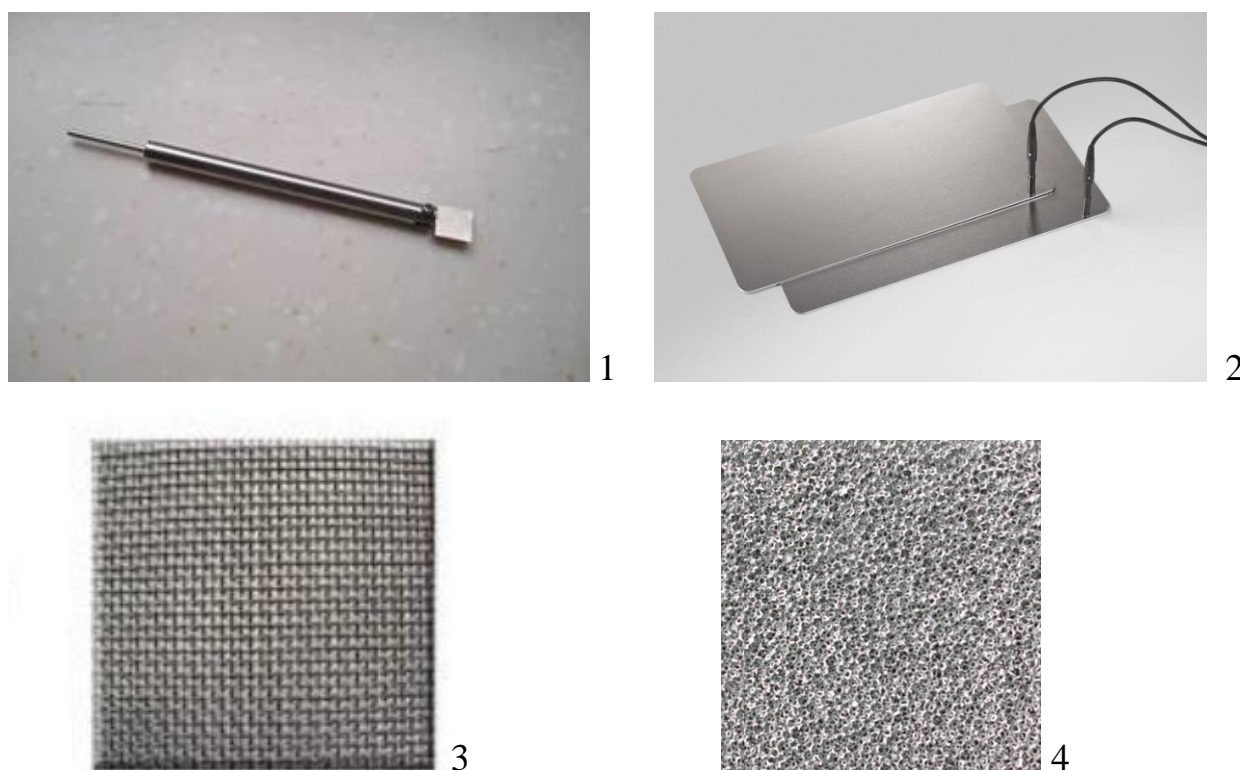


Рис. 1.2.3 Аноди на основі нержавіючої сталі:

1 – паличко-видний електрод з нержавіючої сталі; 2 – пластинчатий електрод з нержавіючої сталі; 3 – сітка з нержавіючої сталі ; 4 – губка з нержавіючої сталі

графітовими електродами в *G. sulfureducens*-MFC через неоптимізований інтерфейс біоплівка/електрод (Dumas et al., 2008). Проте, в 2012 році Показной та інші замінивши пластину з нержавіючої сталі на мікро-структуровану сітку з нержавіючої сталі, показали різке підвищення продуктивності MFC, досягнувши

еквівалентної та вищої продуктивності, ніж з використанням популярної та широко використовуваної електробіотехнологіями вуглецевої тканини, продемонструвавши перспективність анодів на основі нержавіючої сталі (Pocaznoi et al., 2012). Для збільшення їх ефективності Кетеп (Ketep et al., 2014) запропонував тривимірну піну з нержавіючої сталі. МФС з анодом у вигляді 3D-піни нержавіючої сталі виробляв струм вищий у 4 рази, ніж при використанні звичайного аноду з пластинчатої нержавіючої сталі та у 2 рази вищий, ніж при застосуванні вуглецево-тканинного аноду. Висока пористість і великі розміри пор 3D-електроду дозволять біоплівці розвиватися всередині піни та експлуатувати значну частину внутрішньої поверхні електрода (Ketep et al., 2014) (рис. 1.2.4). Модифікація поверхні нержавіючо-стальних анодів також виявилася ефективною стратегією підвищення ефективності роботи електро-біосистем на їх основі (Kalathil et al., 2017; Liang et al., 2017). Нержавіюча сталь, а особливо в 3D-формі, має хороші перспективи як біоанод завдяки своїй електропровідності та стійкості в зовнішньому середовищі, проте недоліком є його висока вартість.

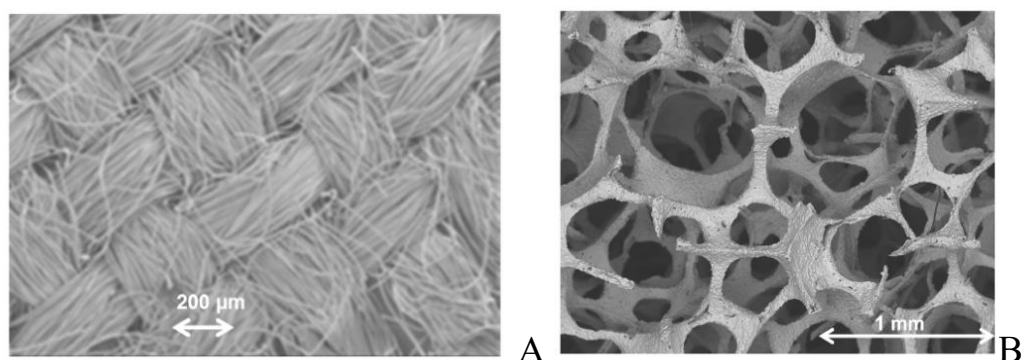


Рис. 1.2.4 Внутрішня структура електродів, отримана з допомогою скануючого електронного мікроскопа (Ketep et al., 2014): А – карбонової тканини та В – піни з нержавіючої сталі. 3D-матеріали для електродів є новою та ефективною стратегією у розробці продуктивних рослинно-мікробної біотехнології отримання біоелектрики.

Перспективи в отриманні мікробної біоелектрики мають і металом вкриті аноди з інших матеріалів. Суттєве зростання електропродуктивності вдалося

досягнути при покритті карбонових електродів металами, зокрема Mn^{4+} , та медіаторними молекулами транспорту електронів (Park & Zeikus, 2002). MnO_2 в цьому випадку діє як твердий проміжний продукт та медіатор в ланцюзі передачі електронів (Pinto, 2016). Приєднання металів CaS , Fe_3O_4 , FeS до графітових електродів є ще одною ефективною стратегією оптимізації біоаноду (Yasri & Nakhla, 2016).

Як катоди найбільш багатообіцяючими є платинові та вуглецеві катоди (Pinto, 2016). Висока вартість та нестабільність в результаті каталітичних процесів при довготермінованому застосуванні обмежують використання Pt-базованих катодів. *Біокатоди* є новою стратегією MFC- та PMFC-технологій, що використовує каталітичну активність мікроорганізмів для редукції на катоді (He & Angenent, 2006). Бергель і Молліка (Bergel & Mollica, 2005) дослідили, що застосування катоду, вкритою біоплівкою підвищує продуктивність електро-біосистеми на 95%. Вони пояснили цю різницю каталітичним ефектом біоплівки для реакції відновлення кисню та продемонстрували перспективи застосування бактеріального катоду для заміни коштовним катодам (Bergel & Mollica, 2005). Біокатоди є високостабільними навіть в несприятливих умовах. Калатил та інші розробили анаеробний MFC біокатод на основі гранульованого активованого вугілля для обробки стічних вод, який показав високу ефективність і щодо очищення стічних вод та генерації струму, і щодо стабільності (Kalathil et al., 2011; Kalathil et al., 2012; Kalathil et al., 2013). У відсутності кисню, нітрати та сульфати виступають як акцептори електронів за участі денітрифікуючих та сульфатредуючих бактерій (He & Angenent, 2006).

Деякі MFC і PMFC технології застосовують катіон- та аніонобмінні мембрани (Timmers et.al, 2012). Іонний потік позитивних та негативних іонів в електро-біосистемі, що мігрують до протилежно заряджених електродів в цьому випадку контролюється іонообмінною мембраною залежно від її складу. Іонообмінні мембрани зазвичай складаються з гідрофобних полімерів, до яких приєднані заряджені групи (Pinto, 2016). Катіонобмінні мембрани (Cation Exchange Membranes, CEM) з'єднані з негативними групами $-SO_3^-$, що дозволяє

дифундувати лише позитивним іонам, таким як, протони та інші катіони. І, навпаки, аніонообмінні мембрани (Anion Exchange Membranes, AEM) містять позитивні прищеплені групи $-NR_4^+$, що сприяють дифузії негативно заряджених іонів (Pinto, 2016). Міграції молекул-паразитів, відповідно, аніонів та катіонів, як через СЕМ, так і АЕМ є незначні (Harnisch et al., 2008).

Протонообмінну мембрану (Proton Exchange Membrane, PEM) використовують як сепаратор в деяких видах електро-біотехнології (Pinto, 2016). Найбільше значення використання PEM має в водневих паливних елементах: для попередження злиття кисню і водню; для сприяння каналу дифузії протонів з аноду до катода, а також, в електро-системах, де потрібно відокремити певні компартменти, обмежити дифузію кисню до аноду. В MFC, як і в PMFC застосування PEM є не обов'язковим, оскільки газ не застосовується та електроди забезпечують направлений рух протонів (Pinto, 2016; Nitisoravut & Regmi, 2017). Основним недоліком мембрани є підвищення внутрішнього опору MFC та PMFC, втрати дифузії протонів, створення бар'єру для бактерій (Pinto, 2016). MFC без сепарації на компартменти з доповненим поглиначем кисню, високоефективним повітряним катодом дозволяють оптимізувати роботу MFC (Gil et al., 2003).

Розташування електродів у субстраті з коренями рослин та ґрунтовими мікроорганізмами має значний вплив на вихідну потужність електро-біосистеми (Nitisoravut & Regmi, 2017). Глибина розміщення електроду в субстраті (Takanezawa et al., 2010), відносне положення анода і катода (Oon et al., 2015) та розмір електродів (Klaisongkram and Holasut, 2014; Ueoka et al., 2016) є важливими факторами, що розглядаються під час моделювання PMFC. На початку розвитку технології, під час перших випробувань *in situ* (Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010) та згодом (Moqsud et al., 2015) електроди розміщувалися поверхнево: в рисовому полі анод був занурений неглибоко, на 2–5 см під заболоченим ґрунтом, а катод залишався на поверхні води. Було показано, що розміщення анодів на глибині більше 5 см приводить до більш ефективного отримання біоелектрики, в порівнянні з поверхневим розміщенням аноду на глибині 2 см (Takanezawa et al., 2010). Аналогічні результати були отримані

Денгом та іншими у ґрунтовому субстраті з MFC (Deng et al., 2014), більш високу продуктивність отримували, коли анод поміщали в ґрунт глибше, ніж як на 5 см. Вибір оптимальної відповідної зони для розміщення анодів є важливим з точки зору забезпечення низької концентрації кисню у субстраті (Takanezawa et al., 2010; Nitisoravut et al., 2017). Крім цього, зона від 5 см є найбільш багатого на кореневі виділення, субстрати для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів, що має вплив на генерацію біоелектрики мікробно-рослинними угрупованнями. Ветсер та інші (Wetser et al., 2015b) продемонстрували, що 30-ти см- та 50 см- болотні слої продукують менше біоелектрики, ніж 10 см-слої, які, очевидно, менш багаті на коріння рослин та органічні сполуки, ніж верхні шари. Наявність кореней біля електродів збільшує концентрацію ризодепозитних сполук. В той же час, у торф'яному болоті, що містило значні кількості опалого коріння не виявлено різниці у генерації біоелектрики з глибиною до 50 см (Wetser et al., 2015b). Ці результати підтверджують, що генерацію біоелектрики можуть запускати не лише кореневі ексудати живих рослин, але і біорозпад рослинного опаду (Timmers et al., 2012).

Аналогічно, змінюючи відстань анода від кореневої зони можна змінювати потужність енергії (Chiranjeevi et al., 2012). Найвищі значення електрогенезу були зафіксовані безпосередньо біля ризосфери (1007 мВ) і з віддаленням від зони коренів на 16 см показники біоелектрики суттєво падали (220 мВ), що демонструє вирішальну роль корневих ексудатів у генерації біоелектрики (Chiranjeevi et al., 2012). Уеока та інші (Ueoka et al., 2016) у дослідженнях у PMFC рисових заболочень показали, потужність енергії електро-біосистем також залежить і від розміру електродів та припустили, що анод є обмежуючим фактором в роботі електро-біотехнології до часу, поки мікробіоценоз не завершить акліматизацію до нових умов наявності електродів в екосистемі, а в подальшому робота електро-біосистеми залежить від продуктивності катоду, який обмежує ефективність роботи системи.

На теперішній момент розроблено два основні типи розміщення електродів в MFC та PMFC-технологіях, які мають значення у максимізації отримуваної

біоелектрики: пластинчаста та тубулярна (рис. 1.2.5). Пластинчаста конфігурація передбачає розташування катодів та анодів у вертикальних чи горизонтальних площинах в зоні коріння рослин (рис. 1.2.5). Така конфігурація може передбачати наявність протонобмінної мембрани або бути без неї. Планарна архітектура була розроблена для зменшення внутрішнього опору і опробована для MFC (Min & Logan, 2004). Ченг та інші (Cheng et al., 2006) показали, що зменшуючи відстань між електродами в реакторі MFC можна збільшити його потужність. Необхідним є створення умов для швидшого транспортування іонів до катодної області, щоб зменшити внутрішній опір, тим самим збільшити продуктивність системи (Sleutels et al., 2009). Високі показники отримуваної біоелектрики були отримані і в PMFC-технології з використанням плоского чи пластинного дизайну електробіосистем: струм збільшувався в 10 разів і густина потужності зростала в 2 рази на площу посадки тієї самої рослини: від 0.15 A/m^2 до 1.60 A/m^2 і від 0.22 Вт/м^2 до 0.44 Вт/м^2 в порівнянні з тубулярною конфігурацією (Helder et al., 2012b).

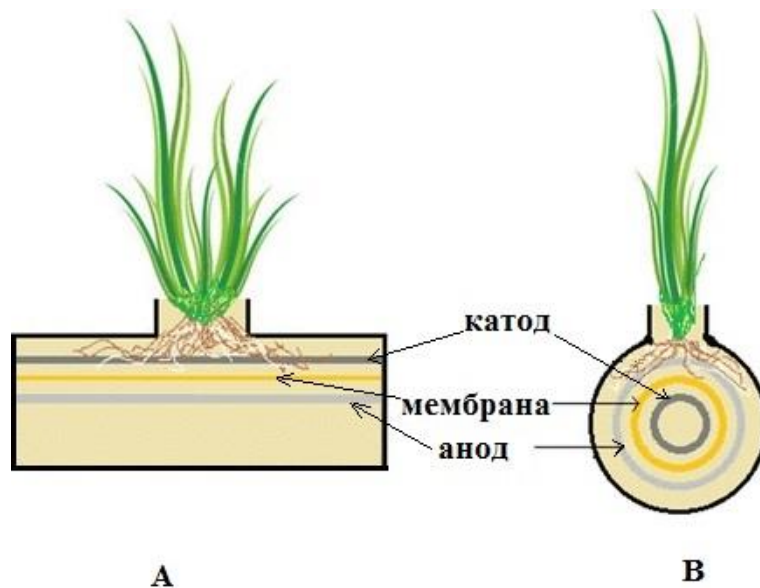


Рис. 1.2.5 Схема пластинчастого (А) та тубулярного (В) розташування електродів у технології рослинно-мікробної біоелектрики (схема розроблена на основі Borker et al., 2017)

Тубулярна конфігурація передбачає розташування катодів та анодів циліндрично один довкола одного у зоні ризодепозиту (рис. 1.2.5). Тубулярний дизайн технології як більш зручний для інсталяції в ґрунт без його перекопування запропонували в 2013 році Тіммерс та інші (Timmers et al., 2013). В 2017 році Ветсер та інші (Wetser et al., 2017) розробили тубулярні електро-біосистеми для отримання біоелектрики призначені для застосування у торф'яному ґрунті з максимальною денною генерованою потужністю 22 мВт/м^2 та 82 мВт/м^2 на солончаках. Перспективним методом підвищення ефективності PMFC шляхом зміни його конфігурації є застосування спіральних елементів в тубулярних системах, що на MFC показало хороші результати (Zhang et al., 2013).

На теперішній момент, проблеми стратегій обробки поверхні електродів, моделювання високо-електропродуктивних конфігурацій та висока вартість матеріалів електродів перешкоджає розширенню практичного використання електро-біосистем (Kalathil et al., 2017). Дослідження нових дешевих і стабільних в середовищі матеріалів для електродних систем та ефективних стратегій їх модифікації, оптимальної відстані розташування електродів від поверхні субстрату та коріння, оптимального розміру електродів та виду конфігурацій електродних систем є актуальними завданнями електро-біотехнології, оскільки вони мають значний вплив на вихідну потужність рослинно-мікробних електро-біосистем.

1.3 Субстрати рослинно-мікробних біосистем

Вплив середовища рослинно-мікробної біосистеми на електропродуктивність є дуже вагомим, оскільки його склад, рН, структура визначає тип мікробної спільноти, яка генерує біоелектрику та впливає на електрогенеративні метаболічні процеси (Nitorisavut & Regmi, 2017).

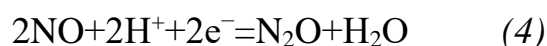
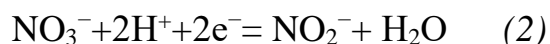
Концентрація кисню та нітрат- і сульфат-іонів в середовищі має дуже важливе значення для генерації біоелектрики. В утворенні біоелектрики важливу роль відіграють протони, які виділяються мікроорганізмами в результаті розкладу

органічних сполук, так і внаслідок дисоціації вугільної кислоти, утвореної з CO₂ (Strik et al., 2008). Вуглекислий газ виділяється у великих кількостях коренями у ґрунт в процесі дихання рослин та в процесі метаболізму ґрунтових мікроорганізмів (Strik et al., 2008).

Утворення біоелектрики пов'язане з редукцією на катоді кисню з утворенням води (1), але також можливий зв'язок із анаеробною редукцією нітрату чи сульфату.



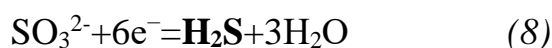
Денітрифікуючі бактерії з допомогою редуктазних ензимів деоксигенують (біоредують) на катоді нітрат-іони до нітрит-іонів (2) з подальшим перетворенням через NO і N₂O та до нітрогену (3, 4, 5) (Black et al., 2016):



Clauwaert et al. (2007) продемонстрували денітрифікацію *на катоді*, що супроводжується генеруванням біоелектрики. Електропродуктивність була пропорційною до кількості доступного нітрату. В той же час група Helder et al. (2011) показали, що, навпаки, усунення нітрату з ростового середовища PMFC для рослин веде до збільшення струму та виходу біоелектрики. Очевидно, концентрація нітратів у середовищі може мати різний вплив на електропродуктивність в залежності від типу електро-біосистеми, виду мікробіому та рослин. У випадку PMFC Helder et al. (2011) низьку генерацію

струму у багатому нітратному середовищі пояснюють використанням їх як альтернативного акцептора електронів зразу на аноді.

Сульфатредукуючі бактерії, утилізуючи органічні сполуки в процесі анаеробного дихання використовують сульфати як кінцевий акцептор електронів, в результаті чого за допомогою специфічних ферментів редукують присутній в середовищі сульфат до сірководню через реакції утворення аденозинфосфосульфату (APS) (6) і сульфіту (7) (Muyzer & Stams, 2008):



Утворений в реакції (7) сульфіт може відновлюватися за одну або кілька реакцій (9, 10).



або



Для багатьох мікроорганізмів відомий також процес асиміляційної сульфатредукції, коли більшість утвореного сірководню (сірки) засвоюються на потреби клітин для синтезу сульфурвмісних амінокислот та білків, а в середовище виділяються лише незначні кількості гідрогенсульфіду чи мінерального сульфуру. Сульфатредукція є оборотним процесом: ряд сіркоокислюючих бактерій можуть зворотно перетворювати проміжні продукти, сульфіт чи тіосульфат, до сульфату із вивільненням енергії. Утворений сірководень також може перетворюватися під дією мікроорганізмів до елементарного сульфуру чи сульфіту та сульфату (Rabus

et al., 2000). Характерною ознакою багатьох сульфатредуючих бактерій є їх здатність до нітрогенфіксації.

Сульфат виступає альтернативним акцептором електронів на аноді, тому його присутність є небажаною для отримання біоелектрики (Ivanov et al., 2017; Morris & Jin, 2009). Проте, в експериментах з PMFC у синтетичному середовищі було показано зменшення сили струму з 400 mA/m^2 до 200 mA/m^2 при усуненні невеликої кількості сульфату з середовища, і, зворотнє зростання при повторному додаванні сульфату до середовища (Helder et al., 2011). Зниження генерації біоелектрики замість очікуваного зростання автори пояснюють реокисленням на аноді утвореного гідрогенсульфіду до сульфуру або сульфату (Helder et al., 2011). Утворення сірководню в реакції перетворення сульфату є стресовим ефектом для рослин та мікроорганізмів (Rabaey et al., 2006, Wetser et al., 2017). Ймовірно, позитивним фактором для отримання біоелектрики є перетворення сульфату в реакціях асиміляційної сульфатредукції, бо відбувається усунення альтернативного акцептора електронів, водночас не утворюється токсичний сірководень чи реокислений сульфат. Також усунення сульфату спряжене з наступним перетворенням сірководню до сульфуру може підвищити ефективність утворення біоелектрики.

На аноді в природному середовищі можлива присутність чотирьох ймовірних кінцевих акцепторів електронів: кисню, нітрату, сульфату та вуглекислого газу (Timmers et al., 2012). На основі спостережень за MFC електро-біосистемами природних водойм чи стічних вод виявлено, що мікроорганізми надають перевагу таким сполукам як кінцевим акцепторам електронів, які нижче подані в порядку їх преференції: O_2 , NO_3^- , оксиди Mn (IV), оксиди Fe (III), SO_4^{2-} і CO_2 . Тобто, сульфати, які можуть бути присутні в болотистих середовищах, чи широко поширений CO_2 , як природний кінцевий метаболіт біохімічних шляхів всіх живих організмів, не є основними конкуруючими молекулами. Нітрат-іони є основними конкурентними молекулами. Це підтверджують і результати отримані в процесі досліджень мікробної анодної популяції. Група сульфатредуючих бактерій на аноді не була вельми чисельною, в той же час як значна кількість електро-

активних мікроорганізмів роду *G. sulfurreducens* and *G. metallireducens* та денітрифікаторів родин *Rhodocyclaceae* and *Comamonadaceae* були присутні на аноді (Timmers et al., 2012). *G. sulfurreducens* and *G. metallireducens* є відомі своєю властивістю редукувати оксиди Fe (III) в природних осаждениях седиментах (Holmes et al. 2004). Залізо-редуктори мають більш високу швидкість конверсії низько-молекулярних органічних сполук, наприклад, ацетату та водню, ніж сульфат-відновлюючі бактерії та метаногени, що надає їм конкурентну перевагу, чим пояснюється їх чисельність та основна роль в електрогенезі (Van Bodegom & Scholten, 2001). Кисень є фаворитним акцептором електронів (Hamelers et al., 2010) і його концентрація в середовищі є дуже важливою. Деякі бактерії є однаково електро-активними незалежно від присутності акцепторів електронів в середовищі. Як показав Pinto в 2016 році *S. oneidensis* здатна передавати електрони на анод і у присутності конкурентного акцептора електронів.

Дифузія кисню у надмірній кількості в області аноду знижує генерацію струму (Timmers et al., 2012b; Pinto, 2016, Wetser et al., 2017), як і наявність в середовищі у високій концентрації сульфат- та нітрат-іонів знижує продуктивність електро-біосистем. В той же час, низька концентрація кисню на катоді теж знижує оперативність MFC (Zhao et al., 2006; Wetser et al., 2017) Реакція відновлення кисню на катоді (oxygen-reduction reaction, ORR) часто є фактором, що лімітує генерацію біоелектрики в MFC та PMFC технологіях (Gil et al., 2003, Wetser et al., 2017). Ефективним вирішенням проблеми оптимальної концентрації кисню в природній електро-біосистемі PMFC є глибинне розташування аноду, де концентрація кисню є нижчою, та більш поверхневе розташування катоду. Подібна стратегія успішно застосована в конструйованій болотній MFC (Guadarrama-Perez et al., 2019). Пошук оптимального дизайну без кисневої дифузії на анод та збагачення киснем катоду є важливим фактором у розвитку рослинно-мікробних електро-біосистем.

Середовища, використовувані в PMFC є синтетичними та природними. PMFC як дочірня технологія MFC часто використовує синтетичні рідкі середовища, подібно, як застосовує їх MFC, отримуючи біоелектрику в

біореакторах (Pant et al., 2009), використовуючи католіт та на аноліт або спільне середовище. В багатьох експериментах основою синтетичного субстрату для електро-біосистем є *модифіковане середовище Hoagland для гідропоніки* (Taiz & Zeiger, 2006; Timmers et al., 2010), що складається з KNO_3 , NH_4Cl , NH_4HCO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, KCl .

Стрік та інші (Strik et al., 2008) нейтралізували модифіковане середовище Hoagland внесенням NaOH до pH 7 та додавали ацетат калію, готуючи таким чином анолітне середовище анодного компартменту. Катодне відділення електро-біосистеми наповнювали демінералізованою водою із фосфатним буфером (K_2HPO_4 і KH_2PO_4 , 20 mM, pH 7). Хелдер та інші (Helder et al., 2010) вирощували рослини в складі електро-біосистем на графітових гранулах, щоденно підживлюючи їх модифікованим розчином Hoagland з фосфатним буфером як анолітом та фосфатно-буферним католітом (Strik et al., 2008), а для *Spartina anglica* створюючи високосолевмісне середовище (20 г/л NaCl) (Helder et al., 2010). В наступних роботах використовували модифіковані середовища Hoagland (Timmers et al., 2010) з низьким вмістом нітрату або сульфату та з високою концентрацією амонію хлорид чи амонію бікарбонату із додаванням бікарбонатного буферу та диетилен-триамінепента-ацетат-залізо-натрієвим комплексом (DTPA-Fe) і NaCl для збільшення електропровідності (Helder et al., 2011). В процесі культивування католіт разово замінювався на гексаціаноферат калію ($\text{K}_3(\text{FeCN})_6$, 50 mM) з 10 г/л NaCl і усувався після стабілізації катодного потенціалу (Helder et al., 2011). Або ж до модифікованого розчину Hoagland додавали фосфатний буфер, створюючи єдине ростове середовище, без поділу на католіт і аноліт, а також стартово додавали ацетат калію (10 mM) чи глюкозу (10 mM) як джерела електронів для формування активної біоплівки (Timmers et al., 2012). Для посадки рослин залишкові донори електронів усували промиванням графітових гранул (Timmers et al., 2012). В експериментах з пластинчастим дизайном електро-біосистем, де було вперше отримано струм 1.6 A/m^2 та густину потужність 0.44 W/m^2 , нормалізовану до засадженої рослинами площі, використовувалося багате макро-та мікронутрієнтами синтетичне середовище без

фосфатного буферу чи ацетату і глюкози із ДТРА-Fe комплексом (Helder et al., 2012) (табл. 1.3). Відсутність фосфатного буферу могло бути причиною зростання показників біоелектрики через його вплив на рНградієнт (Helder et al., 2012). Середовище на основі розчину Hoagland з ферріціанідом було використано в дослідженнях (De Schamphelaire et al., 2008; Sophia & Sreeja, 2017). Синтетичне середовище, застосоване в електро-біосистемі Ліу та інш. (Liu et al., 2013) було єдиним для всієї електро-біосистеми, і складалося з 50 mM фосфатного буферу з рН 7.4, глюкози (0.2 г/л), NH_4Cl (0.15 г/л), KCl (0.13 г/л), NaHCO_3 (3.13 г/л) (NH_4) $_2\text{SO}_4$ (5.6 г/л), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (2 г/л) та слідових кількостей $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (200 мг/л), H_3BO_3 (3 мг/л), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (2.4 мг/л), $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1 мг/л), $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (2 мг/л), ZnCl_2 (5 мг/л), $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (10 мг/л), $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.4 мг/л).

Ще іншим підходом є використання в РМФС системах синтетичних відходів для культивування мікроорганізмів та рослин. Оон та інш. (Oon et al., 2015) у рослинно-мікробній електро-біотехнології використовували синтетичне середовище рідких відходів, основу якого становив ацетат натрію, що готувалося з наступних сполук (концентрація в мг/л): CH_3COONa (204.9), $\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$ (107.1), NH_4NO_3 (176.1), $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (36.7), NaCl (7.0), $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (3.4) і $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (4.0). Електро-біосистема з канною індійською (Yan et al., 2018) розвивалася на кварцованому піску з електродами, куди подавалися синтетичні відходи, основою яких були наступні сполуки (мг/л): глюкоза $\cdot \text{H}_2\text{O}$ (112.33), NH_4Cl (48.59), KH_2PO_4 (7.69), $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (17.73), $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (17.67), ZnCl_2 (7.54), CaCl_2 (17.64), CH_3COONa (100.20). Рослини розвивалися на штучних болотах, з'єднаних з МФС, одночасно продукуючи біоелектрику та усуваючи забруднення з відходів (Yadav et al., 2012; Fang et al., 2013; Oon et al., 2015).

Позитивом використання синтетичних середовищ в РМФС технології є те, що ростові субстрати з точно відомим складом дозволяють вивчити вплив тих чи інших сполук на генерацію струму. Проте застосування багато-компонентних складних синтетичних середовищ, їх заміна в процесі культивування, ускладнює технологію, а також, обмежує застосування РМФС *in situ*.

Іншим типом середовищ, застосовуваних у технології мікробно-рослинної біоелектрики є природні. Природні середовища, ґрунтові субстрати, самі їх неорганічні та органічні сполуки можуть виступати донорами електронів для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів окрім рослинного ризодепозиту, зокрема, присутні в них залізо, сульфур, гумінова кислота (Meek & Chesworth, 2008). Досліджень роботи електро-біосистем в природних ґрунтах, і особливо, *in situ*, є небагато і, більшість з них присвячені вивченню електро-біосистем у заболочених ґрунтах. Перші дослідження функціонування електро-біосистем безпосередньо в рисових заболочених ґрунтах було проведено Каку та інш. і Таканезава та інш. (Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010). Чен та інш. (Chen et al., 2011) вивчали вивільнення кисню коренями паростків рису у електро-біосистемах із свіжим ґрунтом рисових заболочень, відібраному у провінції Китаю у лабораторних умовах. Ветсер та інш. (Wetser et al. 2015b, 2017) досліджували функціонування електро-біосистем у торф'яному болоті та болотистих солончаках, відібраних з природного середовища Національного парку Нідерланд у сконструйованих болотах в лабораторії. Даї та інш. (Dai et al., 2015) досліджували роботу електро-біосистем у заболочених ґрунтах лісів Південної Кароліни, США *in situ* та у лабораторних умовах. Моксуд та інш. у своїх дослідженнях використовували болотистий ґрунт для рису та компост, зібраний з агрогосподарств Японії (Moqsud et al., 2015), заболочений органічний ґрунт агрогосподарств в лабораторних умовах (Moqsud et al., 2017). Вдосконалення і розробки електро-біосистеми з субстратом рисових заболочень проводяться дослідниками і по теперішній час (Srivastava et al., 2018). *In situ* PMFC-експерименти проводяться на природних заболочених рисових полях Японії та Індонезії (Ueoka et al. 2016; Sudirjo et al., 2019).

Застосування неболотистих ґрунтів в PMFC технологіях представлено в небагаточисленних роботах і інтерес до них зростає в останні роки, оскільки використання ґрунтів в PMFC технології дозволяє значно розширити спектр застосування рослинно-мікробної електробіотехнології. Де Шамфелер та інш. (De Schamphelaire et al., 2010) використали для PMFC-експериментів ґрунт на основі

торфу, збагаченого сполуками нітрогену, фосфору, калію, сульфату та органічними сполуками в лабораторних умовах. Садовий ґрунт застосовано в

Таблиця 1.3 Типовий склад синтетичного середовища для РМФС-біотехнологічних систем. Макроелементи і мікроелементи доданих солей у демінералізованій воді становили середовище для рослинно-мікробної біосистеми (Helder et al., 2012)

Сполуки	Назва солі	Концентрація, мг/л
Макронутрієнти	NaCl	1000.00
	NH ₄ HCO ₃	553.50
	CaCl ₂	222.00
	NH ₄ H ₂ PO ₄	115.10
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	123.25
	Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	142.10
	KCl	223.68
	Мікронутрієнти	KCl
H ₃ BO ₃		0.773
MnSO ₄ ·H ₂ O		0.169
ZnSO ₄ ·7H ₂ O		0.288
CuSO ₄ ·5H ₂ O		0.062
H ₂ MoO ₄ (85% MoO ₃)		0.040
CoCl ₂ ·6H ₂ O		1.000
Na ₂ SeO ₃		0.050
C ₁₄ H ₁₈ N ₃ O ₁₀ FeHNa		5.000
NiSO ₄ ·6H ₂ O		0.03

лабораторних умовах в ризосферних R-MFC з малинною травою (Chiranjeevi et al., 2012), на використанні типового садового ґрунту та ґрунту міських парків у електро-біосистемних експериментах *in situ* зосередили свою увагу і ми, починаючи 2014 року (Rusyn, 2014), такий субстрат використовується і в останніх сучасних електро-біосистемних експериментах з кімнатними рослинами (Sarma et al., 2018; Gomora-Hernandez et al., 2020) та з *Chlorophytum*-MFC (Tou et al., 2019), як і піщаний суглинистий ґрунт (Khudzari et al., 2018).

Вплив як синтетичних, так і природних субстратів рослинно-мікробних паливних елементів на роботу біосистем генерації біоелектрики є недостатньо вивченим через складний полікомпонентний хімічний склад та структуру. Особливо важливим є через вміст кінцевих акцепторів електронів: кисню, нітрат- та сульфат-іонів, які нерідко обумовлюють тип мікробного метаболізму, що в кінцевому результаті позначається на генерації біоелектрики. Дослідження функціонування електро-біосистем в природних середовищах має важливе значення, оскільки дозволяє вивчити роботу PMFC безпосередньо в навколишньому середовищі та адаптувати їх до умов *in situ*, знизити бюджет електро-біосистем, розширити асортимент рослинних компонентів, необмежуючись лише гігрофітами.

1.4 Значення мікробних спільнот у функціонуванні рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики

Екзоелектрогенна властивість мікроорганізмів має глобальне значення. Ризосферні мікроорганізми, що продукують електричний струм, утилізуючи органічні рослинні субстрати є основою рослинно-мікробної електробіотехнології. PMFC базується на екзоелектрогенній властивості мікроорганізмів віддавати в середовище електрони та протони при окисленні органічних субстратів, які надходять до електропровідних матеріалів електродів (Strik et al., 2008; Vombelli et al., 2016). Попри поширену загальну думку, що здатність генерувати електрику притаманна лише незначній кількості родів

мікроорганізмів електрогенераторів, генерація електрики є широко поширеною у світі мікроорганізмів. Здатність мікроорганізмів до міжвидового переносу електронів (Summers et al., 2010; Rotaru et al., 2014; Logan et al., 2019) та переносу електронів на природні метали (Earhart, 2009) (або лабораторні електроди) є стратегією виживання в мікросвіті. Перенос електронів між видами бактерій різних фізіологічних груп є способом організації спільного метаболічного процесу (Gorby et al., 2006; Lovley, 2016; Lovley, 2017), виявом зовнішнього спілкування в світі мікроорганізмів (Monzon et al., 2016), метал-опосередкований перенос електронів при адгезії бактерій на оксидах металів є способом отримання енергії в результаті дихання, асоційованого з окисненням металів (von Canstein et al., 2008), мікроорганізми у кишківнику людини за допомогою виділення електронів можуть електрично взаємодіяти з клітинами епітелію кишківника (Ericsson et al., 2015).

Прямі і непрямі, біотичні і абіотичні механізми позаклітинного трансферу електронів відіграють важливу роль у функціонуванні електро-босистем. Позаклітинний трансфер електронів з клітин мікроорганізмів до аноду, відбувається різноманітними шляхами, включаючи прямі і на непрямі механізми (Schroder, 2007; Lovley, 2008; Lovley, 2016), такі як безпосередній контакт електрода та поверхні мікроорганізма через його мембранні цитохроми (Myers & Myers, 2000; Pirbadian et al., 2014), утворені електропровідні пілі (нанодропи) (Reguera et al., 2005; Gorby et al. 2006; El-Naggar et al., 2010) та електропровідні філаменти (Castro et al., 2013; Li & Li, 2014; Venkidusamy et al., 2015; Eaktasang et al., 2016) або синтезовані молекули, так звані електронні човники (electron shuttles) чи медіатори такі як, флавіни (von Canstein et al., 2008; Xu et al., 2016; Tanaka et al., 2018), феназини (phenazines) (Rabaey et al., 2007), водень (Rosenbaum & Schroder, 2010), еукаріотичні метаболітні шатли (eucariotic metabolite shuttles) (Hubenova & Mitov, 2015) чи абіотичні чинники, такі як провідні мінерали (Kato et al., 2012) і абіотичний карбон (Liu et al., 2012) (рис. 1.1.2).

Електроактивні мікроорганізми включають не лише модельні екзоелектрогени, але і широкий ранг бактерій, в тому числі, протеобактерії і фірмікути, сульфатредукуючі і ацетогенні, археї та еукаріоти. Мікроорганізми, що беруть участь в утворенні біоелектрики описують кількома термінами такими як, електроактивні (Pinto, 2016; Logan et al., 2019), електрико-продукуючі (Logan & Regan, 2006), електрогенні (Debabov, 2008) або електрико-генеруючі. Найбільше вивченими та модельними екзоелектрогенами є види бактерій родів *Geobacter* та *Shewanella*, відомими своєю здатністю до прямого переносу електрону через власні медіаторні шатли та кондуктивні пілі, такі як *G.sulfurreducens* (Bond & Lovley, 2002), *G. metallireducens* (Min et al., 2005), *S. oneidensis* (Gorby et al., 2006; El-Naggar et al., 2010), *S. putrefaciens* (Kim et al., 1999; Park & Kim, 2001). Передача електронів по кондуктивних пілях чи так званих нанодротах є вражаючою характеристикою у світі мікроорганізмів, забезпечуючи трансфер електронів на велику відстань понад см зі швидкістю 10^9 електронів на секунду (El-Naggar et al. в 2010). Електротрофна активність вперше показана для *G. metallireducens* (Gregory et al., 2004). Тому, часто електроактивний мікроорганізм асоціюється лише з *Geobacter* та *Shewanella*, проте, коло мікроорганізмів задіяних в електрогенезі є надзвичайно широке.

До електроактивних мікроорганізмів належать бактерії всіх відділів бактерій, включаючи, протеобактерії та фірмікути, сульфатредукуючі, ацетогенні, археї та еукаріоти (Cordas et al., 2008; Nevin et al., 2010; Tanaka et al., 2018; Logan et al., 2019). Мікроорганізми, на яких вперше показана екзогенна електроактивність були такі найбільш відомі мікроорганізми, як гаммапротеобактерія кишкова паличка *Escherichia coli*, еукаріоти пекарські дріжджі *Saccharomyces* (Potter, 1911), фірмікут ґрунтовий анаероб *Clostridium butyricum* (Davis & Yarbrough, 1962), які і зараз використовуються для вивчення генерації струму в MFC (Deng et al., 2014; Li et al., 2018; Sekrecka-Belniak & Toczyłowska-Maminska, 2018). Здатність генерувати струм в MFC вивчена для бактерій різних відділів при розвитку на різноманітних простих синтетичних та складних середовищах таких як, фірмікутів *Enterococcus gallinarum* на глюкозі (Rabaey et al. 2004) та *Clostridium*

beijerinckii на глюкозі, крохмалі (Park et al., 2001; Niessen et al., 2004), альфапротеобактерії *Rhodopseudomonas palustris* при використанні ацетату, лактату, валеріату, фумарату, етанолу, гліцеролу, дріжджевого екстракту (Xing et al., 2008), бетапротеобактерій *Alcaligenes faecalis* та *Rhodoferax ferrireducens* на глюкозі (Chaudhuri & Lovley, 2003; Rabaey et al. 2004), гаммапротеобактерій *Enterobacter cloacae* на целюлозі (Rezaei et al., 2009).

Електроактивними є бактерії циклу сульфуру, такі як дельтапротеобактерії *Desulfovibrio desulfuricans* (Zhao et al., 2008; Eaktasang et al., 2016), *Desulfobulbus propionicus* (Holmes et al., 2004), *Desulfuromonas acetoxidans* (Bond et al., 2002). Здатність бактерій родини *Desulfobulbaceae* формувати довгі тонкі кабелі з своїх клітин, діаметром одна клітина шляхом з'єднанням тисяч клітин є вражаючим феноменом, що забезпечує швидкий транспорт електронів (Pfeffer et al., 2012; Malkin & Meysman, 2015; Risgaard-Petersen et al., 2015; Lovley, 2017). Електроактивні мікроорганізми виявлені і серед патогенних бактерій, зокрема, *Klebsiella pneumoniae* (Zhang et al., 2008) та опортуністично патогенних *Ochrobactrum anthropi* (Zuo et al., 2008) та *Pseudomonas aeruginosa* (Rabaey et al. 2004). Генерація електрики може відбуватися в екстремальних умовах, як при низькому рН ацидобактеріями *Acidiphilium sp.* (Borole et al., 2008), так і при екстремально високих температурах, як наприклад, гіпертермофільний архей *Pyrococcus furiosus* при 90°C (Sekar et al., 2017). Окрім *S. cerevisiae* (Rawson et al., 2012), екзоелектрогенна активність показана і для інших видів дріжджів (Sayed & Abdelkareem, 2017; Sekrecka-Belniak & Toczyłowska-Maminska, 2018) таких як, *Candida melibiosica* (Hubenova & Mitov, 2010), *Hansenula anomala* (*Pichia anomala*) (Prasad et al., 2005), *Hansenula polymorpha* (Shkil et al., 2011), *Arxula adenivorans* (Hasletta et al., 2011), *Kluyveromyces marxianus* (Kaneshiro et al., 2014).

Мікробна спільнота PMFC – це ключова ланка, яка забезпечує роботу рослинно-мікробних біосистем. Аналіз натуральних мікробних спільнот PMFC (Timmers et al., 2012; Lu et al., 2015; Ueoka et al., 2016), як і MFC (Logan and Regan, 2006; Kan et al., 2010), показав, їх широко різноманітний видовий склад, де

немає єдиного домінуючого виду. Справа в тому, що кількадесят різних видів мікроорганізмів беруть участь в генерації біоелектрики (Deng et al., 2012; Logan et al., 2019). Індивідуальний видовий склад мікробіоценозу у ризосфері спільно формуються субстратом (Cabezas, 2011), його складом (Nitisovarut & Regmi, 2017), pH (Lauber et al., 2009), структурою (Sessitsch et al., 2001; Wakelin et al., 2008), доступністю нітрогену (Frey et al., 2004) та розчиненим киснем, вологістю і температурою (Kabutey et al., 2019), видом рослин та їх ризодепозитом (Singh et al., 2004; Wang et al., 2018), донорами електронів та акцепторами електронів (Cabezas, 2011), типом електродів (Timmers et al., 2012), впливом відкритого та закритого кола (Ahn et al., 2014; Cabezas et al., 2015). Очевидно, відповідно до високої різноманітності використовуваних в PMFC технології середовищ та рослин; сконструйованих та природних екосистем: водних, болотистих; різних типів ґрунтів: звичайних, засолених, лужних чи торф'яних - типи фітоасоційованих мікробіомів, досить відрізняються в кожному окремому біотопі чи лабораторній електробіосистемі.

Більше 27 основних бактеріальних родин в PMFC було продемонстровано Тіммерс та інш. (Timmers et al., 2012) в синтетичному середовищі з *G. maxima* та в мікробіомі природних рисових заболочень (Ueoka et al., 2016) (рис. 1.4), близько 50 основних родів показано в сконструйованих болотних PMFC з трьома різними макрофітами: *Juncus effuses*, *Typha orientalis* та *Scirpus validus*. Молекулярно-генетичні аналізи (Timmers et al., 2012; Ueoka et al., 2016; Wang et al., 2018) показали, що видовий склад бактерій в ґрунті у довкола електродному просторі та безпосередньо адгезованих на аноді відрізняються. *Anaerolineaceae*, *Caldilineaceae*, *Geobacteraceae*, *Acidobacteriaceae* виявлені у значно більшій кількості на аноді в порівнянні з міжелектродним простором (Timmers et al., 2012; Ueoka et al., 2016). Більш високе біорізноманіття було виявлене у ризосфері, в порівнянні з анодом та підвищену кількість *Desulfobulbus sp.* та *Geobacter sp.* у зразках ризосфери (Wang et al., 2018). Подібна різниця продемонстровано і на MFC, оперуючій у ґрунті: біля електродів мікроорганізми були більш

різноманітними, в той час як адгезовані до аноду були більш специфічними, та належали до *Deltaproteobacteria* та *Escherichia coli* (Deng et al., 2014).

В мікробній популяції PMFC можна виділити три основні групи ризосферних мікроорганізмів відповідно до їх функції в утворенні біоелектрики та локалізації такі як

1) анодні мікроорганізми, серед яких зосереджена максимальна кількість мікроорганізмів-екзоелектрогенів, здатних переносити утворені в процесі метаболізму електрони на анод, а також, асоційовані з ними живлячі їх мікроорганізми-донори електронів (De Schamphelaire et al., 2010; Timmers et al., 2012; Kouzuma et al., 2013; Lu et al., 2015; Pinto, 2016; Sarma & Mohanty, 2018);

2) катодні мікроорганізми, так званий, біокатод (He & Angenent, 2006; Rothballer et al., 2015; Pinto, 2016), сформований більшістю електротрофів (Logan et al., 2019), які акцептують електрони, поступлені з аноду та редукують кисень чи нітрат- або сульфат-іон тощо; та

3) мікроорганізми корневих поверхонь та довкола електродного простору, де зосереджено більшість мікроорганізмів-кооператорів екзоелектрогенів, що живлять електроактивні мікроорганізми, забезпечуючи їх простими сполуками в результаті розщеплення складних органічних сполук рослинних залишків і корневих виділень, а також деяка кількість електро-активних мікроорганізмів (Timmers et al., 2012; Ueoka et al., 2016; Wang et al., 2018).

Анодні мікроорганізми відіграють важливу роль у функціонуванні електро-біосистеми як донори електронів. У дослідженнях біомів PMFC *Geobacter* привертає до себе найбільше уваги як найбільш вивчена електроактивна бактерія. Здатність *G. sulfurreducens* колонізувати анод MFC у вигляді структурованої біоплівки було виявлено в дослідженнях (Holmes et al., 2004; Jung & Regan, 2007; Reguera et al. 2006). Вперше присутність *Geobacteriaceae* в PMFC показала група науковців Де Шамфелер та інш. (De Schamphelaire et al., 2010) в рис ризосферно-базованих PMFCs. Наступні дослідження мікробних спільнот PMFC містили підтвердження ролі *Geobacter* в транспортуванні електронів до аноду. Наукова група Тіммерс (Timmers et. al., 2012) показали, що *Geobacter* і зокрема його види,

G. sulfurreducens, *G. metallireducens*, *G. grbiciae*, *G. hydrogenophilus*, частіше виявляються на аноді, графітових гранулах, а не на корінні рослин *G. maxima*. Коузума та інш. (Kouzuma et al., 2013) показав наявність в анод-асоційованому мікробіомі *G. psychrophilus* та синтрофно зв'язаних з ним видів в седиментних MFCs, працюючих у рисових заболочених полях. 16S rRNA-аналіз PMFC на рисових заболочених полях з *O. sativa* показав, що бактерії родини *Geobacteraceae*, і зокрема, *Geobacter pelophilus* і *G. psychrophilus* присутні у міжелектродному субстраті в зовсім невеликій кількості < 0.1%, в той час як у анодних зразках у більше як в 10 раз більшій кількості: 1.8 - 2.4% (Ueoka et al., 2016). У високо електропродуктивних PMFC з *G. maxima* присутність бактерій *Geobacteriaceae* була значно вищою, ніж в низько електропродуктивних PMFC, 0.74 % супроти 0.13 %, відповідно (Timmers et al., 2012), що теж підтверджує їх важливу роль в електрогенезі. Отримані дані вказують на те, що навіть у невеликій кількості мікроорганізми відіграють надзвичайно важливу роль в електрогенезі. Позитивну кореляція між величиною напруги клітини та присутністю *G. sulfurreducens* і *Betaproteobacteria* були отримані в конструйованих болотистих PMFC з водною рослиною *Hydrilla verticillata* (Shen et al., 2018).

Дослідження видового складу мікробіому анодів PMFCs з різними видами рослин, середовищ, електродних систем показало високу різноманітність та наявність домінуючих видів з інших родин крім *Geobacteriaceae*. На анодах рисоризосферно-базованих PMFCs домінантними виявлені відомі нітрогенфіксатори бактерії родин *Rhizobiales* та *Beijerinckiaceae* і *Natronocella acetinitrilica* (Kaku et al., 2008), кабельні та сульфатредуючі бактерії родини *Desulfobulbaceae* та некультивуєчі архебактерії (De Schamphelaire et al., 2010), *Rhizobiales*, *Geobacter*, *Mycococcus*, *Deferrisoma* та *Desulfobulbus* (Ahn et al., 2014), *Geobacter*, *Anaeromyxobacter* та *Anaerolineae* (Caberaz et al., 2015), *Anaerolineaceae* (Ueoka et al., 2016). В сконструйованих болотних PMFC з *C. indica* домінуючими на аноді були *Geobacteriaceae* та ферментуючі *Anaerolineaceae* (Lu et al., 2015). При використанні ґрунту на аноді виявляли бактерії *Desulfobulbus* і з ґрунтом

рисових полів *Geobacter* *Anaeromyxobacter* spp., *Anaerolineae* з *Chloroflexi* (Cabezas, 2011). Бактерії родів *Pseudomonas putida*, *Aeromonas hydrophila*, *Enterobacter cloacae*, *Bacillus tequilensis* та плісневих грибів *Aspegillus* spp. та *Penicillium* spp. були ізольовані в складі анодної біоплівки в РМФС з натуральним ґрунтом та рослинами *Chasmanthe floribunda*, *Papyrus diffusus* та *Chlororophytum comosum* (Azri et al., 2018). Очевидно, різні біотичні та абіотичні фактори приводили до формування різних мікробних спільнот. Серед виявлених на аноді бактеріальних видів є такі, для яких показана екзоелектрогенна активність в чистій культурі, так і такі, для яких ця властивість не досліджена.

МФС, інокульовані мікроорганізмами ґрунту генерували більш високу напругу, ніж чиста культура *G. sulfureducens*, що свідчить про важливість інших ґрунтових бактерій у генерації струму (Jiang et al., 2006). Загалом, *Geobacteriaceae* не виявлені домінантними в багатьох вивчених електро-біосистемах, окрім досліджень Лу та інш. (Lu et al., 2015) та вміст їх в порівнянні з усім анодним мікробіомом є незначним. Очевидно, коло анодних електрон-транспортуючих мікроорганізмів є ширшим та включає і інші види, як виявлені на аноді та досі не вивчені в цьому плані, так і ті, що ще неідентифіковані через методологічні особливості ідентифікації мікроорганізмів і складності культивування, і це представляє широке поле для майбутніх досліджень. Виявлений ультрабаланс в природніх мікробіомах робить їх вразливою структурою та вказує на важливість врахування і підтримки тонких мікробних взаємозв'язків при оптимізації РМФС.

Біокатод привертає все зростаючу увагу дослідників в галузі електро-біосистем в останні роки. Популяцію катодних мікроорганізмів, що беруть участь в електрогенезі називають біокатод (He & Angenent, 2006). Мікроорганізми на катодній поверхні можна об'єднати у два типи: 1) *аеробні* мікроорганізми, які використовують кисень як кінцевий акцептор електронів та здійснюють окислення сполук металів, таких як залізо (II) або марганець (II); і 2) *анаеробні* мікроорганізми, які використовують сполуки, такі як нітрати, сульфат, залізо, марганець, селен, арсенат, уранат, фумарат та вуглекислий газ як кінцеві електронні акцептори (Chen et al., 2008, Deng et al., 2012). Як і на аноді, видовий

склад біокатоду є різноманітним. Молекулярно-генетичні аналізи РМФС, базовані на рослині рису показують, що на катоді переважають гаммапротеобактерії, в той час як на аноді виявлено переважання дельтапротеобактерій (Ahn et al., 2014). В роботі Каку та інш. (Kaku et al., 2008) в рис-базованих РМФС на катоді виявлено *Rhodobacter gluconicum*. *Rhodobacter* належить до пурпурових несіркових аноксигенних фототрофних бактерій і його роль в електрогенезі поки нез'ясована (Madigan & Jung, 2008). Серед різноманітності бактеріальних родин на катоді були виявлені некультивуючі бактерії родин *Thiotrichales*, *Chromatiales*, *Legionellales*, *Methylococcales*, and *Acidithiobacillales*, що належать до гаммапротеобактерій Gammaproteobacteria (Ahn et al., 2014). Серед них багато бактеріальних видів, що можуть окислювати сполуки сульфуру такі як сульфід чи тіосульфат, в тому числі, пурпурові сіркові бактерії. Вид *Acidiferrobacter thiooxydans*, ацидофільний та термотолерантний факультативний анаероб та хемолітоавтотроф займав найбільшу частку на катодах і лише тоді, коли ланцюг був підключений (Ahn et al., 2014). *A. thiooxydans* отримує енергію при окисленні сполук заліза та редукції сполук сульфуру (Hallberg et al., 2011). Очевидно, дані бактерії, виявлені на катоді використовують сполуки сульфуру та заліза як кінцеві акцептори електронів (Ahn et al., 2014). Архейні гени 16SpРНК не були визначені методом полімеразно-ланцюгової реакції (Polymerase Chain Reaction, PCR) у катодних зразках, що дозволяє припустити, що археї відіграють незначну роль у катодній реакції (Ahn et al., 2014).

Досліджень мікробного складу біокатоду є небагато, тому ідентифікація і вивчення мікробних спільнот РМФС має велике значення для розуміння механізмів мікробних взаємозв'язків в процесі електрогенезу, створення оптимальних умов для них в процесі вдосконалення електро-біосистем. Ймовірно, мікробні популяції катоду, працюючого з ґрунтовим субстратом буде якісно іншим, ніж вище оглянуті РМФС рисових заболочень, і як через інші види рослин, так і через особливості субстрату, і зокрема, доступ світла, так як виявлені в чисельній кількості на катоді пурпурові сіркобактерії є строгими

фотоавтотрофами і не пристосованими до метаболізму та росту в темряві (Madigan & Jung, 2008).

Целюлолітичні та ферментуючі бактерії міжелектродного простору є важливими у генерації біоелектрики (Timmers et al., 2012; Kouzuma et al., 2013; Lu et al., 2015; Wang et al., 2018). Між електрохімічно-активними мікроорганізмами та целюлозо-деструкторами (Timmers et al., 2012) або ферментуючими бактеріями (Kouzuma et al., 2013; Lu et al., 2015) були знайдені синтрофні зв'язки. Анаеробні целюлолітичні бактерії домінували на корневих поверхнях та на дні PMFC із *G. maxima*, де були знайдені також електрохімічно-активні мікроорганізми (Timmers et al., 2012). Оскільки зазвичай 35–50% сухої маси рослини складається з целюлози (Lynd et al. 1999), целюлолітично-активні мікроорганізми мають велике значення в перетворенні рослинного опаду та відмерлого коріння до доступних сполук для електро-активних мікроорганізмів (Timmers et al., 2012). Важливість гідролізу целюлози для генерування електрики підтверджено результатами групи Рен та інш. (Ren et al., 2007). Вони продемонстрували, що бінарна культура *Clostridium cellulolyticum* та *G. sulfurreducens* при розвитку на середовищі з карбоксиметилцелюлозою та целюлозою як донором електронів генерували струм, тоді як окремі культури цих бактерій струм не продукували (Timmers et al., 2012). В активно електро-продуктивних PMFC серед целюлолітичних бактерій, що в основному належали до родини *Ruminococcaceae*, переважав вид *Clostridium sporosphaeroides*, а також, були виявлені в невеликій кількості целюлолітичні бактерії родини *Rhodocyclaceae* (Timmers et al., 2012). Асоціація целюлолітичних та електро-активних бактерій була виявлена також на аноді, проте в останньому випадку в більшій кількості були присутні електроактивні мікроорганізми (Timmers et al., 2012). На аноді в PMFC з *C. indica* були виявлені дві домінантні родини ферментуючих бактерій *Anaerolineaceae* та електроактивні *Geobacteriaceae* (Lu et al., 2015). *Anaerolineaceae* здатні ферментувати різного типу цукри, такі як глюкоза, ксилоза, фруктоза, рафіноза до коротколанцюгових жирних кислот та водню (Yamada et al., 2006), що є фаворитним джерелом для *Geobacteriaceae* (Lu et al., 2015). Таким чином, ферментуючі бактерії, як і

целюлотітичні, є посередниками у переносі електронів від рослин до електроактивних мікроорганізмів та є донорами електронів для останніх, мікроорганізмів, що безпосередньо транспортують електрони на анод. Це підтверджують і наступні результати досліджень. У ґрунті міжелектродного субстрату мікробних паливних елементів рисових заболочених полів у великій кількості виявлено *Xantobacteriaceae*, *Clostridiaceae*, *Bacillaceae*, які водночас представлені малочисельно на аноді (Ueoka et al., 2016). *Xantobacteriaceae* відомі своїми властивостями утилізувати різні складні органічні сполуки, як наприклад, ксилозу та ксилан (Zaichikova et al., 2009), поліциклічні та ароматичні сполуки (Hirano et al., 2004), а *Clostridiaceae* та *Bacillaceae* є активними целюлозолітичними бактеріями (Kato et al., 2004; Desvaux, 2005; Kim et al., 2012). Ймовірно, ці родини бактерій відіграють важливу роль у перетворенні складних органічних сполук до простіших сполук у міжелектродному просторі PMFC, будучи в кооперації з електро-активними мікроорганізмами та живлячи їх. Наявність саме в ризосфері PMFC, базованих на макрофітах *J. effuses*, *T. orientalis* і *S. validus* мікробних популяцій *Clostridiaceae* і *Ruminococcaceae*, що гідролізують целюлозу та *Cytophagales*, здатних розкладати складні органічні сполуки мертвих коренів до жирних кислот, що використовуються як субстрати електро-активними мікроорганізмами (Wang et al., 2018) також вказують на очевидні процеси кооперації та синтрофії, обміну електронами між різними групами мікроорганізмів на шляху від рослин до електродів в процесі генерації біоелектрики.

Конкурентні мікроорганізми також наявні у міжелектродному просторі електро-біосистем та можуть суттєво вплинути на процес генерації біоелектрики. Джерелом для розвитку анодних бактерій є органічні речовини з низькою молекулярною вагою, які з'являються у ґрунті в зоні ризосфери в результаті як кореневої екскреції продуктів метаболізму рослин, а також, в результаті целюлолітичної та іншої ферментативної активності бактерій, які розщеплюють складні високомолекулярні сполуки до простих (Timmers et al., 2012). Денітрифікатори, утилізуючі коротколанцюгові жирні кислоти та ацетат-

утилізуючі метаногени, присутні в ризосфері, є конкурентами донорів електронів для електро-активних мікроорганізмів (Timmers et al., 2012; Lu et al., 2015). Вони споживають коротколанцюгові жирні кислоти і використовують їх на свої власні метаболічні процеси. Утилізуючи легкодоступні органічні сполуки, потрібні для розвитку анодних бактерій, цим вони сповільнюють розвиток анодних бактерій і вихід струму (Timmers et al., 2012; Anh et al., 2014; Lu et al., 2015). Основними конкурентами донорів електронів електрогенів у PMFC з *G. maxima* були денітрифікатори (Timmers et al., 2012). Денітрифікуючі бактерії целюлолітичні *Rhodocyclaceae* і *Comamonadaceae*, виявлені у великій кількості в PMFC з *G. maxima* з низькою ефективністю. Вони знижували інтенсивність генерації струму через зниження вмісту жирних кислот, що є субстратами для розвитку анодних бактерій (Timmers et al., 2012). Відносно вища кількість *Methanosarcina*, що була знайдена в низькоєфективних PMFC порівняно з високоефективними сприяла конкуренції за ацетат (Timmers et al., 2012). Метаногени виявляли мінімальну роль як донори електронів у PMFC з *G. maxima* (Timmers et al., 2012). В PMFC з *S. indica* гідрогенотрофні метанотрофи та термофільні археї, утилізуючі H_2 , CO_2 та ацетат, були основними конкурентами донорів електронів електро-активних мікроорганізмів (Lu et al., 2015). Через конкуренцію за ацетат як донор електронів з *Geobacter* кількість ацетогенних метаногенів знижувалася в PMFC у рисових полях, що може мати позитивний ефект для зниження кількості викиду метану заболоченнями (Cabezas, 2011). PMFC, інтродуковані у рисові поля знижували емісію метану майже на 50% (Cabezas, 2011). Вивчення конкуренції за донори електронів всередині мікробної популяції PMFC, глибоке розуміння взаємозв'язків у середині мікробної популяції PMFC є важливим для створення оптимальних умов для генерації біоелектрики (Timmers et al., 2012; Kabutey et al., 2019).

Фактори впливу на формування PMFC мікробних спільнот включають цілий комплекс різних чинників, як біологічних, так технологічних. Дослідження видового складу PMFC з різними видами рослин показало різні результати (De Schamphelaire, 2010; Timmers et al., 2012; Lu et al., 2015; Ueoka et al., 2016), що

приводить до висновку, що ризодепозити різних рослин можуть приводити до формування різних мікробних спільнот, що потребує подальшого вивчення. Тип мікробної спільноти у ризосфері спільно формують середовище, його структура, склад, pH та вид рослин (Berg & Smalla, 2009; Lu et al., 2015). Мікробна спільнота PMFC є багатоманітною структурою, на яку мають прямий вплив безліч факторів, як то вищеописані особливості середовища, чи виду рослин, а також немаловажним є вплив зовнішніх факторів довкілля. Розуміння складного впливу субстрату, рослин та зовнішніх факторів на мікробні взаємозв'язки та формування мікробної спільноти, розуміння фізіології мікробної популяції допомагає зрозуміти конкуренцію серед донорів електронів у PMFC і тим самим створити оптимальні умови для генерації біоелектрики (Kabutey et al., 2019; Timmers et al., 2012). Чим краще мікробна спільнота адаптується до системи, чим більше шансів на покращення її електропродуктивності (Nitorisavut & Regmi, 2017). Вивчення складу і взаємозв'язків мікробіому PMFC має значення для пошуку способів оптимізації електро-біотехнології, створенні оптимальних умов для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів при конструюванні електро-біосистеми.

Отже, мікробна популяція біосистем генерації біоелектрики є складним та малодослідженим явищем. Мікробоценоз ґрунтових PMFC електробіотехнологій складається з трьох груп: 1) ризосферних мікроорганізмів міжелектродного простору, які беруть участь у розщепленні органічних виділень коріння рослин та рослинного опаду та передачі вивільнених електронів/протонів до аноду через кооперацію з іншими мікроорганізмами та низькомолекулярні субстрати; 2) анодних мікроорганізмів, де зосереджена максимальна кількість бактерій, здатних переносити електрони на анод; та 3) катодних мікроорганізмів приймаючи участь в редукції кисню чи нітрат- або сульфат-іону з генерацією електрики. Вдосконалення біотехнології можна досягнути шляхом налагодження оптимальних умов для електрогенезу мікроорганізмів, враховуючи позитивну кооперацію між різними групами мікроорганізмів в процесі генерації біоелектрики PMFC та негативний вплив конкурентних груп мікроорганізмів. Ідентифікація мікроорганізмів PMFC і вивчення їх властивостей та синтрофних

кооперацій у мікробіомі має велике значення для пошуку способів оптимізації електробіотехнології при конструюванні біосистеми генерації біоелектрики.

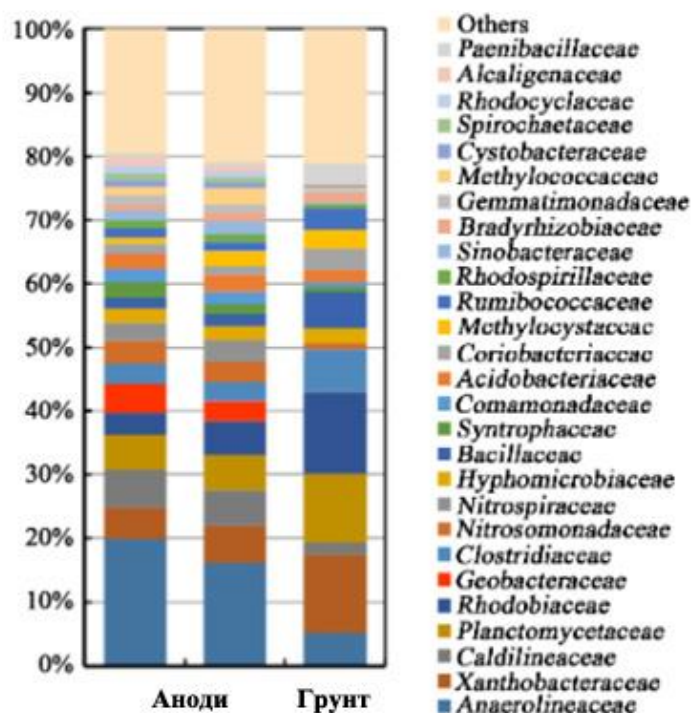


Рис. 1.4 Мікробіом різних анодів та міжелектродного ґрунту рослинно-мікробних біосистем у заболочених рисових полях (Ueoka et al., 2016)

1.5 Роль рослин у ефективності рослинно-мікробної біотехнології генерації біоелектрики

Роль рослин в біосистемах генерації біоелектрики полягає в забезпеченні електроактивних мікроорганізмів органічними субстратами та неорганічними газами і сполуками. Рослини в рослинно-мікробній електробіотехнології мають функцію рушія, запускаючого механізму у генерації біоелектрики під дією сонячної енергії. Сонячна енергія запускає світлову фазу хімічного синтезу АТФ та пов'язу з ним темнову фазу фотосинтезу органічних сполук. Рослини через коріння виділяють насинтезовані сполуки у зону ризосфери (Jones 1998; Walker et al. 2003; Kaku et al., 2008) і накопичують їх у вигляді ризодепозиту (Uren 2001; Bais et al., 2006; Strik et al., 2008). Ризодипозит включає цукри та органічні кислоти, полімерні вуглеводи, лізати, а також гази, такі як етилен та CO₂, що використовуються мікроорганізмами в процесі електрогенезу (Strik et al., 2008, De

Schamphelaire et al., 2008). Хімічні компоненти, такі як флавоноїди, ароматичні кислоти, амінокислоти та дикарбонові кислоти, функціонують як специфічні *хіміоатрактанти* для залучення симбіотичних мікроорганізмів до корневих волосків ризосфери (Dakora & Phillips, 2002). Кілька корневих ексудатів і мікробних метаболітів, мурашина кислота, янтарна кислота, біотин тощо, є посередниками передачі електронів (Schroder, 2007; Chiranjeevi et al., 2012). Рослинна ризосфера є сприятливим мікросередовищем для розвитку мікроорганізмів, утилізуючих рослинний депозит, які в результаті цього запасують електрику (Chiranjeevi et al., 2012). Субстратом для розвитку ґрунтових мікроорганізмів служать не лише екскретовані корінням речовини, але і також, продукти розкладу рослинних залишків (Timmers et al., 2012; Dai et al., 2015; Wetser et al., 2017). Органічні речовини рослинного походження окислюються мікроорганізмами на аноді з утворенням електронів, які поступають на катод, де збирається біоелектрика (Strik et al., 2008; Wetser et al., 2017).

Важливість фотосинтезу для електрогенезу висловлена ще в 2008 році Каку та інш. і Стріком та інш. (Kaku et al., 2008; Strik et al., 2008). Електричний вихід PMFC, базованих на рослинах рису був залежним від сонячного світла; затінення рослин рису приводило до зниження генерації біоелектрики в денний час (Kaku et al., 2008). Вольтаж PMFC з *Glyceria maxima* виявляв світлозалежну реакцію (Strik et al., 2008). Залежність рослинного фотосинтезу і мікробної конверсії органіки в електрику підтверджена згодом численними наступними дослідженнями з різними типами PMFC. Висока густина струму корелювала з інтенсивністю освітлення у денний час в PMFC з водоростями *Lemna minuta* (Hubenova & Mitov, 2012). Під час денного періоду, який пов'язують з фотосинтезом виявлено вищу електрогенну активність PMFC з *Pennisetum setaceum* (Chiranjeevi et al., 2012), *Puccinellia distans* (Khudzari et al., 2018), *Hydrilla verticillata* (Shen et al., 2018). Рівень густину струму та вольтажу відкритого кола (Open Circuit Voltage, OCV) показував денно-нічний циркадний цикл із зниженням вночі та зростанням вдень у PMFC з трьома макрофітами (Azri et al., 2018) та OCV в *Chlorophytum*-MFC системі (Tou et al., 2019). Шенг та інш. (Cheng et al., 2020) представили

аналітичну модель *Pandanus Amaryllifolius* PMFC, ілюструючи процес мікробної генерації електрики при рослинному фотосинтезі, асиміляції CO₂ та ексудації органічних продуктів. Через 120 год. від початку експерименту в ризодепозиті рослини були виявлені різні карбоксикислоти, і серед них в значній кількості ацетат внаслідок вивільнення продуктів фотосинтезу. Модель була підтверджена експериментальними даними, які підтверджують зв'язок постійного росту бактерій з виробленням енергії PMFC (Cheng et al., 2020). Фотосинтетанти продукуються рослинами протягом дня та можуть бути використані для запасання біоелектрики (Strik et al., 2008; Chiranjeevi et al., 2012; Shen et al., 2018). Було виявлено, що сонячне світло значною мірою впливає на кількість органіки, вичерпаної з коріння (Kaku et al., 2008). Крім цього, листя та стебла продукують більше кисню на протязі дня, що створює сприятливі аеробні умови на катоді (Shen et al., 2018).

Водночас, є приклади PMFC, де не виявлено прямого зв'язку між фотосинтезом та генерацією струму. Такі електро-біосистеми можуть ефективно працювати, використовуючи відмерле коріння рослин і для їх функціонування не настільки важливий активний фотосинтез рослин, як важливий великий обсяг кореневої системи, що є прямим субстратом для розвитку целюлозо-деструкторів, зв'язаних з електро-активними анодними мікроорганізмами (Timmers et al., 2012b; Wetser, 2016; Wang et al., 2017). Електрика виробляється у всіх шарах торф'яного ґрунту, в тому числі і в шарі, позбавленого живого коріння, де мікроорганізмами утилізують відмерле коріння, утворюючи електроенергію (Wetser, 2016). Відмерле коріння у верхній частині заболочень та наявні там забруднювачі можуть бути окислені до сполук, які можуть бути використані як акцептори електронів для сприяння утворенню біоелектрики (Wang et al., 2017). Свіжий листяний опад також суттєво підвищує вміст органічних сполук у ґрунті (Chow, 2006; Chow et al., 2013), що може служити субстратом для електро-активних мікроорганізмів. Крім цього, вивчені також PMFC з живими рослинами *Eripretum aureum* та *Dracaena braunii*, де генерація напруги була майже постійною протягом дня, незалежно від світлої та темної фази (Sarma et al., 2018).

Очевидно, PMFC є своєрідною екосистемою, де бактерії і рослини використовують світлу і темну фази разом для сталого виробництва електроенергії (Sarma et al., 2018). Сонячне випромінювання мало невеликий ефект на рис базовані PMFC в період після цвітіння рису (Moqsud et al., 2015). Цей феномен ймовірно пов'язаний з тим, що глюкоза (живлення для мікроорганізмів), що виробляється в зеленому листі завдяки фотосинтезу, використовується рисовим зерном швидше, аніж вивільняється в ґрунт (Moqsud et al., 2015).

Ризодепозит та відмерлі рослинні залишки є двома основними фактори, необхідними для успішного функціонування рослинно-мікробної електро-біотехнології. Для успішної роботи PMFC важливим є створення оптимальних умов для фотосинтезу. Активна фотосинтетична активність рослин максимілізує і кількість корневих ексудатів, але також, приводить до формування потужної кореневої системи, що активніше виводить органічні субстрати, та, водночас самі корені якої при розпаді служать джерелом енергії для целюлозо-деградуючих мікроорганізмів, задіяних в електрогенезі. Обираючи певний вид рослин з високим рівнем кореневої екскреції і розвинутою кореневою системою чи, оптимізувавши умови культивування тої самої рослини, щоб досягнути інтенсивного накопичення ризодепозиту та розвитку коріння, можна вдосконалити електро-біотехнологію.

Вид рослин має велике значення для ефективного функціонування PMFC через індивідуальні особливості ризодепозиту і тип кореневої системи (Singh et al., 2004; Sofia & Sreeja, 2017; Wang et al., 2017). Це вдало ілюструють роботи, де вивчаються кілька видів рослин з тим самим дизайном PMFC та однаковими умовами середовища. Електро-продуктивність циліндричних PMFC з тими самими графітовими гранулами та графітовими паличками та графітовою тканиною, Хоагланд розчином як субстратом із *Spartina anglica* була в 10 разів вищою, ніж з рослинами *Arundinella anomala* (Helder et al., 2010). Однакові PMFC, базовані на карбоново-щітковому аноді з новим глиняним сепаратором та вуглецевим аерокатодом з трьома різними рослинами *Trigonella foenum-graecum*,

Canna stuttgart і *Brassica juncea* показували різну електропродуктивність: перші два види рослини демонстрували вищу генерацію біоелектрики, ніж третій вид (Sofia & Sreeja, 2017). З трьох досліджених макрофітів в сконструйованих заболочених мікробно-паливних елементах (constructed wetland microbial fuel cell, CW-MFC), базованих на фетрових вуглецевих волокнах, два види рослин *Typha orientalis* та *Scirpus validus* характеризувалася значно вищим виходом біоелектрики, ніж *Juncus effuses*-PMFC (Wang et al., 2017). PMFC з графітовими катодом і анодом та натуральним ґрунтом як субстратом і з *Chlorophytum comosum* показували найвищі значення потужності енергії, ті самі PMFC в тих самих умовах з *Chasmanthe floribunda* і *Papyrus diffusus* демонстрували помітно, на порядок, нижчі значення (Azri et al., 2018). CW-MFC з гранульовано-активовано-вугільним анодом і платиною вкритим карбоновим катодом та з *Cyperus prolifer* показували вищі значення густини потужності та вольтажу, ніж ті самі системи з іншими корінними Південно-Африканськими рослинами заболочень *Wachendorfia thyrsiflora* і *Phragmites australis* (Oadly et al., 2019).

В багатьох випадках, високо електропродуктивні рослини мали більш густу та розвинуту кореневу систему і відповідно вищий рівень корневих виділень та вивільнення кисню, в порівнянні з менш продуктивними (Sofia & Sreeja, 2017; Oadly et al., 2019). На ризодепозицію впливають багато факторів, в тому числі генетично визначена морфологія кореня (Nitisovarut & Regmi, 2017). Вид рослин визначає якісний та кількісний склад мікробної флори ризосфери (Berg & Smalla, 2009), очевидно, в тому числі впливає на електроактивні мікроорганізми (Sofia & Sreeja, 2017; Azri et al., 2018). Вище наведені результати показують, що вибір рослини для електро-біотехнології є дуже важливим, електро-біотехнологію PMFC можна вдосконалити підібравши оптимальний вид рослин. Одночасно, підібравши оптимальні умови для розвитку певного виду рослини можна ще більше зростити вихід біоелектрики електро-біосистеми, оскільки на кореневу ексудацію та розвиток кореневої системи рослин впливає велика кількість факторів, таких як склад середовища та атмосфери, освітлення і фотоперіод,

температура, дефоліація тощо (Kuzyakov, 2002; Deng et al., 2012; Nitisovarut & Regmi, 2017).

Електропродуктивність біотехнологій залежить також від віку та стадії розвитку рослини (Hubenova & Mitov, 2012). З культурою рису посівного виявили, що найбільший вихід струму спостерігається на вегетативній стадії росту та кущіння, і знижується у репродуктивній фазі (Deng et al., 2016). Ймовірно, у фазі плодоношення органічні сполуки в більшій мірі використовуються на власні потреби рослини, ніж виводяться назовні. Як впливає вікова стадія розвитку інших видів рослин, однорічних та багаторічних рослин, рослин різних фізіологічних груп, дерев на їх електропродуктивність, питання залишається відкритим і малодослідженим.

Фотосинтетичний шлях рослини та її електропродуктивність в PMFC вивчалися протягом останніх років. Рослини з C4 фотосинтетичним шляхом теоретично є оптимальнішим варіантом для PMFC, оскільки мають вищі обсяги конверсії сонячної енергії в органічні речовини, ніж C3 та CAM рослини, і, відповідно, нагромаджують більшу кількість ризодипозиту, що є субстратом для мікробного окислення, крім цього, C4 рослини є більш стійкими до високих температур та посухи, ніж C3 рослини (Helder et al., 2010; Wang et al., 2012; Regmi, 2017; Kabutey et al., 2019). В багатьох випадках вихід струму був вищим у C4 рослини-базованих PMFC (Nitisovarut & Regmi, 2017). З однією з найбільш популярних в PMFC рослиною, *S. anglica*, що належить до C4 рослин, в лабораторних умовах вдалося досягнути помітно вищих значень отримуваної біоелектрики, ніж з C3 фотосинтетичною рослиною *Oryza sativa* на рисових полях, що може бути зумовлено як видом рослин та фотосинтетичним шляхом, так і також, типом мікробіому, складом синтетичних і природних середовищ, лабораторними умовами та типом електродних систем, оскільки використовувалися різні їх конструкції. Проте приналежність до C3 чи C4 фотосинтетичного шляху реально не завжди є однозначною рекомендацією для PMFC. Зокрема, *A. donax*-PMFC, C3 фотосинтетична рослина, показував вищу фотосинтетичну активність, ніж C4 види (Helder et al., 2010). Хоч два види *A.*

anomala та *S. anglica* належали до одного C4 фотосинтетичного типу, вони істотно, на порядок, різнилися між собою за електропродуктивністю (Helder et al., 2010). Рівень електропродуктивності *Eichhornia crassipes*-PMFC, що має C3 фотосинтетичний шлях є на рівні C4 рослини *S. anglica* базованої PMFC (Venkata Mohan et al., 2011). Невиявлено кореляції між електропродуктивністю та фотосинтетичним шляхом C4 у роботі Азрі та інш. (Azri et al., 2018): *Papyrus*, рослина C4 фотосинтетичного типу, мала нижчий біоелектричний потенціал, ніж C3 рослина *Chlorophytum*. САМ рослини мають перспективи для електробіосистем через свою невибагливість, вони населяють сухі і посушливі регіони, проте швидкість їх росту невисока, що може означати невисоку кількість ризодепозиту (Regmi, 2017). Поясненням отримання вищих чи нижчих показників з рослиною C3 чи C4 фотосинтетичного шляху є лише одним з комплексу факторів, таких як матеріал та дизайн електродних систем, умови субстрату і середовища, що впливають на електро-активну мікробну спільноту та нагромадження ризодепозиту рослинами та відповідно, на електропродуктивність PMFC. Вплив типу фотосинтетичного шляху на електропродуктивність рослини в PMFC є неоднозначним і безумовно важливим і потребує подальшого дослідження.

Рослини заболочень є піонерами PMFC, різні їх види, такі як багаторічні і солестійкі рослини, локальні та широко поширені, інвазивні рослини та бур'яни заболочень широко застосовуються при виборі рослин для PMFC та мають важливе практичне застосування. За історію розвитку технології в PMFC досліджено більше шістдесяти видів рослин. Піонерами у дослідженні PMFC були агрокультура рису *Oryza sativa* (De Schamphelaire et al., 2008; Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010; Bombelli et al., 2013) та болотні трави: *Glyceria maxima* (Strik et al., 2008; Timmers et al., 2012; Timmers et al., 2013) і *Spartina anglica* (Helder et al., 2010; Timmers et al., 2010; Helder et al., 2012; Wetser et al., 2015b) (рис. 1.5.1). Як і багато інших рослин PMFC, перші рослини електробіотехнології були рослинами заболочень. *O. sativa* є вологолюбною рослиною, що

росте безпосередньо у воді та є важливою сільсько-господарською культурою субтропіків та тропіків (Kaku et al., 2008).



Рис. 1.5.1 Перші розробки рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики проводилися з рослиною *Spartina anglica* на зелених дахах (А) та в лабораторних умовах (В) (Helder et al., 2012): 1 – анодний компартмент, 2 – катодний компартмент, 3 – дроти від аноду, 4 – дроти від катоду, 5 – зовнішній резистор, 6 – референсний електрод, 7 – точка подавання води та ростового середовища для рослин, вихід з анодного компартменту, 9 – рослина *S. Anglica*

Лепешняк великий, *G. maxima*, росте як на заболочених територіях, так і безпосередньо у водоймах із невеликою течією, в анаеробних седиментах річок, широко поширений в країнах помірних широт трьох континентів (Strik et al., 2008). *S. anglica* є солетолерантним видом трав, здатним рости в заболочених умовах, колонізує заболочені прибережні площі припливних грязевих країн помірних широт, де виступає як інвазивний вид і завдає шкоди місцевим природним соляним екосистемам (Holmer et al., 2002; Helder et al., 2010; FLORON, 2014).

Зараз, як і на початку розвитку РМФС, рослини заболочених місцезростань залишаються найбільш популярними об'єктами в якості біологічних компонентів електро-біосистем, їх досліджено близько чотирьох десятків. Це пов'язано з кількома чинниками, зокрема, сприятливістю болотистих умов для збору біоелектрики. В анаеробних умовах заболочень до мінімуму зведене проникнення

кисню до аноду та пов'язана з цим втрата циркулюючих електронів та протонів (Strik et al., 2008; Kaku et al., 2008; Helder, 2013), а також, заболочені анаеробні території є ідеальними для розвитку електрико-продукуючих мікроорганізмів (Lovley et al., 2011). Дослідження болотистих рослин пов'язано також з масштабністю частки заболочених територій в світі, які можна було б використовувати як джерело альтернативної енергії, можливістю одночасного зниження викидів метану заболочень та перспективами використання PMFC з водними рослинами для очищення стічних вод (Deng et al., 2012; Wetser, 2016). Тому слідом за *O. sativa*, *G. maxima* і *S. anglica*, близько сорока інших видів рослин вологих середовищ, а також водоростей, зокрема *Lemna minuta* (Hubenova & Mitov, 2012), було досліджено на предмет перспективності у використанні в електро-біосистемах для генерації біоелектрики, зокрема (рис. 1.5.2):

- аїр болотний *Acorus calamus* (Yan et al., 2015), водяна або прибережна рослина, що зростає на болотистих луках та болотах, на берегах і на мілководдях річок, озер Північної півкулі та походить з Південно-Східної Азії;
- прибережна рослина *Artemisia fukudo* (Moqsud et al., 2017), поширена на морському узбережжі Північного Тайваню і Японії та Кореї;
- тростянка аномальна *Arundinella anomala* (Helder et al., 2010), очеретоподібна рослина заболочених місць, природний ареал якої від Сибіру на сході Росії до Індонезії, північно-східного Китаю, Кореї і Японії;
- тростник гігантський *Arundo donax* (Helder et al., 2010), очеретоподібна рослина, що зростає в безпосередній близькості від водойм та одна з найбільш швидкозростаючих рослин у світі, що може сягати до 5 м, природний діапазон поширення якої Азія, Китай, Індія, Індонезія, Малайзія та широко натуралізована і культивується в інших країнах;

- канна індійська *Canna indica* (Yadav et al., 2012; Lu et al., 2015), *Canna Stuttgart* (Sophia & Sreeja, 2017), тропічна рослина вологих місцезростань,



Рис. 1.5.2 Традиційно використовувані у електробіотехнологіях водяні та болотисті рослини у їх природному місцезростанні: 1 – *P.australis*, 2 – *T. latifolia*, 3 – *A. donax*, 4 – *A. anomala*, 5 – *A. calamus*, 6 – *E. crassipes*, 7 – *C. involucratus*, 8 – *C. indica*, 9 – *I. aquatica* (Wikipedia, © per.aasen, Biswarup Ganguly, Ted Center, USDA)

що зростає по берегах річок та струмків Центральної та Південної Америки, культивується як *декоративна* садова рослина;

- хлорофітум *Chlorophytum comosum* (Azri et al., 2018; Tou et al., 2019), невеличка трав'яниста вічнозелена рослина, широко поширена в Алжирі, Африка, у вологих околицях річок тропіків і субтропіків Америки та Південної Африки, що культивується як *декоративна* кімнатна та садова рослина;
- *Chasmante floribunda* (Azri et al., 2018), *декоративна* садова рослина, що походить з Півдня Африки, натуралізована у Австралії, Новій Зеландії, Аргентині, Алжирі та Каліфорнії (США);
- папірус (циперус) парасолевидний *Cyperus involucratus* (Klaisongkram et al., 2015), багаторічна водна рослина тропіків, що утворює зарослі по берегах рік, боліт і озер, батьківщиною якої є Мадагаскар та острови західної частини Індійського океану;
- мініатюрна папіросовидна осока *Cyperus prolifer*, вічнозелена водолюбива рослина, що зростає у водно-болотних місцевостях Південної Африки (Oodally et al., 2019);
- драцена браунії *Dracaena braunii* (Sarma & Mohanty, 2018), рослина, що зустрічається в прибережних лісах Камеруну, Екваторіальної Гвінеї, Габону та Республіки Конго, добре переносить морський бриз від прибою, а також, популярна кімнатна *декоративна* рослина, що добре піддається як гідропонічному, так і ґрунтовому вирощуванню;
- водний гіацинт *Eichhornia crassipes* (*Echiorria crassipes*) (Venkata Mohan et al., 2011; Ramintuan et al., 2018a), водна рослина амазонського басейну, поширюється у водоймах Африки та південної Америки як бур'ян, вкриваючи водойми суцільним зеленим килимом, що перешкоджає судноплавству та рибальському промислу;
- водорослі *Echinochloa glabrescens* (Bombelli et al., 2013), асоційовані з *O. sativa* на заболочених рисових полях;

- епіпремум золотистий *Epipremnum aureum* (Sarma & Mohanty, 2018), витка ліана, що походить з Французької Полінезії, розташованої в центрі південної частини Тихого океану, декоративна рослина, що культивується по всьому світу, в тому числі гідропонним методом;
- іпомея водна чи китайський шпинат *Ipomea aquatica* (Liu et al., 2013; Pamintuan et al., 2018b), водна тропічна рослина, що росте у водоймах та вологих ґрунтах як бур'ян на Сході та Півдні Азії;
- півники болотяні *Iris pseudacorus* (Yang et al., 2019), декоративні рослини, зростають на болотах, заплавах та берегах річок по усіх континентах;
- мухомор зефірний *Hydrocotyle verticillata* (*Hydrilla verticillata*) (Moqsud et al., 2017; Shen et al., 2018), водна річкова рослина, що зростає в заболочених і вологих місцях Південної та Північної Америки і Вест-Індії, застосовується у акваріумах як невибаглива рослина;
- ряска дрібна *Lemna minuta* (Hubenova & Mitov, 2012);
- циперус розсіяний *Papyrus diffuses* водна чи прибережна рослина (Azgi et al., 2018);
- водний салат *Pistia stratiotes* (Pamintuan et al., 2018b), багаторічна вічнозелена водна рослина, бур'ян всіх теплих прісних водойм у США та тропічних країнах, використовується в акваріумах;
- очерет звичайний *Phragmites australis* (Wetser et al., 2015b; Yang et al., 2019), космополітична рослина, що росте по болотах, заливних луках, берегах озер та рік в Європі, Азії, Північній Африці, в Північній та Південній Америці;
- покісниця розставлена *Puccinellia distans* (Khudzari et al., 2018), солестійка трава, що розвивається у вологих та лужних місцезростаннях північних широт;
- білозіркова осока *Rhynchospora colorata* (Moqsud et al., 2017), водна річкова рослина, поширена в Північній і Південній Америці та Вест-Індії;
- осока Табернемонтана *Scirpus validus* (Wang et al., 2017), космополіт, що зростає по вологих ґрунтах та мілководді, декоративна садова рослина;

- рогіз *Typha angustifolia* (Saz et al., 2018), гідрофіт широко поширений у світі: в Євразії, Північній Америці, Північній Африці, Австралії;
- рогіз кумбунгі *Typha domingensis* (Cervantes-Alcala et al., 2012), рослина заболочених територій в помірних і тропічних регіонах, поширений в мангрових акваекосистемах Мексики;
- рогіз широколистий *Typha latifolia* (Oon et al., 2015), широко поширена рослина по берегах водойм, у ровах, на лісових болотах Євразії, Північної та Південної Америки і Африки;
- рогіз *Typha orientalis* (Wang et al., 2017), гідрофіт з природним ареалом: Австралія, Нова Зеландія, Малайзія, Індонезія, Південно-Східна Євразія;
- червоний корінь *Wachendorfia thyrsiflora* (Oodally et al., 2019), ендемічна водна рослина Південної Африки заввишки біля 2 м.

Більшість рослин РМФС технології є багаторічними, що мають перевагу над однорічними через більш активну секрецію органічних речовин в ґрунт (Lynch & Whipps, 1990; Kuzyakov & Domanski, 2000), що веде до нагромадження у прикореневій зоні ґрунту потужнішого ризодепозиту (Dennis, 2010), від засвоєння якого мікроорганізмами залежить продукування біоелектрики. *Солестійкість рослин* є важливою характеристикою рослин для РМФС технології, оскільки високий вміст солі у електроліті збільшує його провідність (Helder et al., 2010). Крім солерезистентної *S. anglica* в РМФС досліджено також інші солетолерантні рослини заболочень, серед них *Puccinellia distans* (Khudzari et al., 2018), *Artemisia fukudo*, *Phragmites australis* (Wetser et al., 2015b; Moqsud et al., 2017; Yang et al., 2019). *P. distans* є перспективним видом трав для РМФС застосувань у місцях, де існують сольові умови, наприклад, у холодних регіонах, де дорожня сіль застосовується протягом зимових місяців для обробки засніжених доріг (Khudzari, 2018). Порівнюючи електропродуктивність РМФС на основі водних рослин, які рясно ростуть в Японії, таких як солетолерантних рослин морської води *A. fukudo* та *P. australis* з рослинами свіжої води *Hydrocotyle verticillata* та *Rhynchospora colorata* (Ishikawa & Kachi, 2000; Mauchamp & Mesleard, 2001) було виявлено перевагу морських рослин в генерації біоелектрики, а морські седименти

характеризувалися підвищеною електричною провідністю, аніж органічний ґрунт (Moqsud et al., 2017). Якщо для PMFC вибрано солестійкі види трави, можна скористатись її перевагами, використовувачи високопровідні електроліти, тобто, працюючи в сольових умовах (Khudzari et al., 2018).

Поширення рослини при виборі її для технології PMFC має велике значення, оскільки космополізм рослини розширює можливості її застосування у біоелектричних системах по всьому світу, водночас, використання *локальної* рослини має переваги найбільшої економічної доцільності у конкретній країні. PMFC на основі широко поширених по світу рослин заболочень є небагато, це зокрема, PMFC на основі очерету та рогозу, що ростуть по берегах водойм, у ровах та болотах по всіх континентах: *Phragmites australis* (Corbella et al., 2014; Wetser et al., 2015b; Moqsud et al., 2017; Yang et al., 2019), *Typha latifolia* (Oon et al., 2015), *Typha domingensis* (Cervantes-Alcala et al., 2012). PMFC на основі *Typha orientalis* (Wang et al., 2017), *Typha angustifolia* (Saz et al., 2018), *Phragmites australis* (Yang et al., 2019) досліджені як біоелектро-хімічні платформи для одночасного отримання електрики та усунення забруднення з стічних вод. Комбінація водної рослини *Acorus calamus* та седиментних MFC вела до ефективної деградації пірену та бензопірену в седиментах (Yan et al., 2015). В багатьох випадках болотисті рослини PMFC є *специфічними для певного регіону*, як наприклад, тропічні рослини *Cyperus involucratus*, поширені на Мадагаскарі та островах західної частини Індійського океану (Klaisongkram et al., 2015), ендемічні рослини Південної Африки *Cyperus prolifer* та *Wachendorfia thyrsoflora* (Oodally et al., 2019) чи *A. fukudo*, поширена в Північному Тайвані, Японії і Кореї (Moqsud et al., 2017) тощо, що також розробляються для біоремедіації.

Водяні та прибережні бур'яни нерідко використовуються у PMFC, що оптимізує їх кошт-ефективність в біотехнології через доступність рослин та відкриває перспективи отримання користі від бур'янових інвазій. Показана перспективність використання електро-біосистем на основі *Irpea aquatica*, що росте як бур'ян у водоймах та вологих ґрунтах тропіків (Liu et al., 2013; Pamintuan et al., 2018b), *Pistia stratiotes*, що є бур'яном теплих прісних водойм у США та

тропічних країнах (Pamintuan et al., 2018b) одночасно як джерела біомаси для їжі та біоелектрики. Водний шпинат, *I. aquatica*, ціниться як їжа для людини, а біомаса водного салат-латука, *P. stratiotes*, як корм для худоби (Pamintuan et al., 2018b), що забезпечує подвійну вигоду їх використання як джерела енергії та їжі. PMFC на основі *Echinochloa glabrescens*, бур'яна агрокультури рису *O. sativa* на заболочених рисових полях, також може використовуватися для отримання біоелектрики, проте його електрогенна активність є нижчою і швидкість утворення заряду є у 6 разів повільнішою, ніж в *O. sativa*-PMFC (Bombelli et al., 2013). У водоймах Африки та південної Америки як бур'ян поширюється *Eichhornia crassipes*, вкриваючи водойми суцільним зеленим килимом, що перешкоджає судноплавству та рибальському промислу. Розроблені PMFC на основі *E. crassipes*, названі плаваючі макрофітні екосистеми (floating macrophytic ecosystem, FME), можуть одночасно використовуватися для очищення домашніх побутових стічних вод, стічних вод спиртового заводу та отримання біоелектрики (Venkata Mohan et al., 2011; Pamintuan et al., 2018a). Очерет звичайний *P. australis* є одним з найбільш інвазивних видів в Північно-Східній Америці (Tougas-Tellier et al., 2015; Khudzari, 2018) і CW-MFCs базовані на ньому розробляються для усунення поллютантів з муніципальних відходів та продукування біоелектрики (Yang et al., 2019).

Отже, рослини рису, болотні трави та водяні макрофіти (гідрофіти) є найбільш вивченими рослинами у PMFC (Regmi 2017). Макрофіти часто використовуються в CW-MFC, побудованих водно-болотних мікробних паливних елементах, оскільки ці класи рослин добре відомі своєю фітореMediaційною здатністю (Regmi 2017), а також, для харчових потреб. Застосування багаторічних, солестійких, космополітичних і локальних рослин, бур'янів і агрокультур гідрофітів у PMFC технології має вплив на їх бюджетність чи/та електропродуктивність.

Мезофітів та ксерофітів, рослин, що на противагу болотистим рослинам потребують лише помірні та невеликі кількості вологи для розвитку було досліджено значно менше, трохи більше 10-ти із більше як 60-ти досліджених в

PMFC технології, як біокомпонентів рослинно-мікробної технології отримання біоелектрики, таких як:

- агапантус африканський *Agapanthus africanus* (Gomora-Hernandez et al., 2020), корінна рослина Південної Африки, що культивується, як декоративна садова рослина, солетолерантна;
- гірчиця салатна *Brassica juncea*, що зростає на легких супіщаних і суглинних ґрунтах (Sophia & Sreeja, 2017), засухотолерантна культура, що має застосування в кулінарії;
- кордиліна кущова *Cordyline fruticosa* (Rosa et al., 2019), вічнозелена тропічна рослина, автохтонна рослина Полінезії, а тепер розповсюджена на інших островах Тихого і Індійського океану, в Південно-Східній Азії, Австралії та Мексиці;
- свинорий пальчастий *Cynodon dactylon* (Gilani et al., 2016), газонна трава та бур'ян, вид популярний у використанні на спортивних майданчиках в теплих і помірних кліматичних умовах по всьому світу;
- рожевий гіацинт *Hyacinth pink* (Yang et al., 2019), декоративна рослина, що вирощується у ґрунті;
- пажитниця багаторічна або англійський райграс *Lolium perenne* (Habibul et al., 2016), пасовищна трава, стійка до витоптування і ущільнення ґрунту природний ареал якої Європа, Азія та Північна Африка;
- *Pandanus amaryllifolius* (Cheng et al., 2020), тропічна рослина Південно-Східної Азії та Південної Азії, що використовується для ароматизації та як барвник в кулінарії, культивується і як кімнатна декоративна рослина;
- малинова фонтанна трава *Pennisetum setaceum* (Chiranjeevi et al., 2012), посухостійка рослина родом з Північної та тропічної Африки, Близького Сходу та Південної Азії, що поширилася в деяких штатах США та Австралії;
- очиток *Sedum* (Taria et al., 2017), сукулентна засухотолерантна рослина поширена на луках Євразії, Африки, Північної та Південної Америки;

- арабський дволопасник *Schismus arabicus* (Gilani et al., 2016), посухостійка трава родом з Північної Африки та Середньої Азії;
- пажитник грецький *Trigonella foenumgraecum* (Sophia & Sreeja, 2017), однорічна культура, що росте на глинистому ґрунті і має застосування в кулінарії як приправа;

В останні роки з'являються роботи по вивченню мохів як об'єктів електро-біотехнології:

- *Dicranum montanum* (Hubenova & Mitov, 2011);
- *Physcomitrella patens* (Bombelli et al., 2016).

Неболотисті рослини привертають увагу науковців в останні роки при створенні РМФС. Близько одного-двох десятків видів посухостійких рослин та мезофітів, що можуть розвиватися в умовах помірного вмісту вологи у ґрунтовому субстраті досліджено як біокомпоненти рослинно-мікробної технології отримання біоелектрики. Ксерофітні РМФС можуть мати важливе значення для застосування в країнах із засушливим кліматом та бути важливими для технології зелених дахів. В цьому контексті важливими є виявлені перспективи як біокомпонентів у складі РМФС широко кпоширених у всьому світі трав, таких як мезофітів *Lolium perennee* (Habibul et al., 2016), *Cynodon dactylon* (Gilani et al., 2016), і локальних посухостійких афканських та азійських трав *Schismus arabicus* (Gilani et al., 2016) та *Pennisetum setaceum* (Chiranjeevi et al., 2012) тощо. РМФС, базовані на посухостійких рослинах сукулентах *Sedum* на зелених дахах в посушливому та напівзасушливому середовищі можуть бути використані як індикатори рівня вологи у ґрунті (Tarja et al., 2017). Мохи є багатообіцяючим об'єктом РМФС технології завдяки їх високій толерантності до низького вмісту вологи та виживанню в широких температурних умовах (Hubenova & Mitov, 2011; Bombelli et al., 2016). На базі мохів розроблені Moss-РМФСs, що здатні енергоживити прилади такі як звичайне комерційне радіо та LCD дисплей метеостанції (Bombelli et al., 2016). Електро-біосистеми з мезофітом *L. perennee* є новим способом усунення Cr (VI) з стічних вод чи ґрунту *in situ* (Habibul et al., 2016). Асоціація фіторемедіації та біоелектрохімічної техніки

значно знижує експлуатаційні витрати та збільшує загальну ефективність видалення поллютанта за допомогою очищення на місці забрудненої води або ґрунту (Habibul et al., 2016). Самопідтримуючий живлення сенсор для спостережень за показниками довкілля був створений на основі PMFC базованого на *Sansevieria asparagaceae*, сукулента, адаптованого до життя в сухому кліматі для застосування в смарт містах (Ayala-Ruiz et al., 2019).

Агрокультури серед мезофітних рослин в якості біологічних компонентів PMFC є малодослідженими (Nitisovarut & Regmi, 2017) і їх вивчення лише розпочинається. Отримання біоелектрики в кошт-ефективний спосіб було розроблено для пажитника *Trigonella foenum-graecum*, однорічної рослини, і гірчиці *Brassica juncea*, що вирощується з кулінарною метою як приправа та ароматизатор у промислових масштабах Середній та Південній Азії (Sophia & Sreeja, 2017). Функціональна модель PMFC, що показала весь процес виробництва від органічної сполуки до отримання електричної енергії розроблена на основі мезофіта *Pandanus amaryllifolius*, тропічної рослини Південно-Східної та Південної Азії, що має застосування для ароматизації та як барвник в кулінарії (Chang et al., 2020). Хоч використання агрокультур на орних землях не є круглорічним, пов'язаний з терміном вирощування однорічних рослин залежним від кліматичних умов, проте PMFC можуть забезпечувати деякі енергопотреби, що виникають в цей відрізок часу. Біоелектротехнології, вмонтовані в землях сільськогосподарського призначення можуть жити автономні системи поливу та датчики вологості ґрунту, інноваційні системи моніторингу за складом ґрунту та ростом рослин в рамках розумного господарства.

Отже, PMFC на основі посухотолерантних рослин активно розвиваються в останні роки, мають важливе значення для застосування в країнах із засушливим кліматом та окрім як джерела енергії мають перспективи для використання для енергоживлення приладів низького споживання, біосенсорування, очищення ґрунтів від поллютантів, облаштування зелених дахів та в якості їжі.

PMFC технологія на основі *декоративних рослин*, як гігрофітів, *рослин заболочень*, так і посухорезистентних, є важливою з точки зору перспективи

одночасного отримання біоелектрики та створення форм ландшафтного дизайну. На даний момент більшість компонентів декоративних електро-біосистем є на основі вологолюбних рослин, проте розробляються і РМФС, базовані на рослинах, мало залежних від вологи. РМФС на основі декоративних космополітних рослинах заболочень *Iris pseudacorus* (Yang et al., 2019), *Scirpus validus* (Wang et al., 2017), *Hydrilla verticillata* (Moqsud et al., 2017; Shen et al., 2018) здатні ефективно очищувати забруднені стічні води і одночасно генерувати електрику. Дослідження оптимізації дизайну РМФС, базованого на вологолюбних декоративних тропічних рослинах роду *Canna* та їх мікробіому важливо для застосування їх з енергетичною метою і для очищення стічних вод в країнах Центральної і Південної Америки, де вони поширені та Індії і Індонезії, де вони культивуються (Yadav et al., 2012; Lu et al., 2015; Sophia & Sreeja, 2017; Yang et al., 2019). Вивчення РМФС на основі *Caltha palustris*, рослини заболочень, поширеної в помірному поясі Євразії і Північної Америки, що є *першоквітком* та *зимостійкою* рослиною, що витримує морози до -35 С, є актуальним, оскільки може відкрити перспективи її широкого застосування в країнах з суворим кліматом (Rusyn et al., 2019).

Використання садових декоративних рослин в РМФС у якості кімнатних дає змогу їх круглорічного використання в будівлях по всьому світу як джерела електрики, так і для одночасного очищення повітря і створення естетичних зелених зон. Досліджено модифіковані електроди для підвищення ефективності роботи РМФС з кімнатними вологолюбними рослинами *Euphorbia aureum* і *Dracaena braunii* (Sarma & Mohanty, 2018), вивчено вплив факторів зовнішнього середовища на функціонування вологолюбних *Chlorophytum comosum* РМФС (Azri et al., 2018; Tou et al., 2019) та *Chasmante floribunda* і *Papyrus diffuses* базованих електро-біосистем та їх перспективи як джерела відновлювальної енергії (Azri et al., 2018). Зелена енергія мезофітних декоративних *C. fruticosa*-РМФС здатна жити і забезпечувати в реальному часі роботу сенсорних систем IoT низького споживання WSN (de la Rosa et al., 2019). Електронний девайс, заряджений протягом трьох днів від *Agapanthus africanus*-РМФС, мезофітній декоративній

рослині, був здатний частково *підзарядити розряджений мобільний телефон* (Gomora-Hernandez et al., 2020). PMFC на основі декоративних рослин є кроком до розвитку альтернативних самопідтримуючих джерел електрики як у зелених смарт-будівлях, так і зовнішньому середовищі (de la Rosa et al., 2019; Lytvyn et al., 2020).

Отже, PMFC технології розробляються як для лабораторних умов чи умов приміщень, так і для використання *in situ* в різних кліматичних зонах, очевидно, через це вимоги до рослин електробіотехнології є різні. Відповідно, кожна конкретна розробка PMFC потребує рослин, які розвиваються найбільш оптимально в тих чи інших певних умовах. Важливою властивістю рослини як біокомпонента електробіотехнології є пристосування до певних конкретних умов, чи то заболочених, чи то засушливих, або інтенсивного сонячного опромінення на зелених дахах, або затінення в приміщеннях. Для ефективної роботи технології PMFC важливими є створення оптимальних умов для інтенсивного фотосинтезу, кореневої екскреції та розвитку кореневої системи. Базовими необхідними характеристиками рослин для ефективної роботи PMFC є високий рівень фотосинтетичної активності рослин, формування активно розвинутої кореневої системи, швидких темпів росту, багаторічності, додатковими позитивними властивостями є їх невибагливість до умов культивування та субстрату, стресостійкість та резистентність до цілого ряду зовнішніх факторів: здатність виживати в широких температурних межах, морозорезистентність, посухостійкість, солетолерантність, стійкість до захворювань, а також, широко поширеність по світу або ж в локальному регіоні, здатність до ремедіації, декоративність, можливість використання в сільському господарстві чи промисловості (Nitorisravut & Regmi, 2017; Regmi 2017; Khudzari, 2018). Незважаючи на проведені дослідження, лише невелика частка рослин досліджена в якості елемента PMFC та придатності для електро-біосистем. Дослідження в електробіотехнології космополітичних та специфічних рослин різних регіонів, вологолюбних та посухостійких, геліофітів та тінетолерантних, декоративних і агрокультур представляє значний інтерес для розвитку та вдосконалення

біотехнології отримання рослинно-мікробної біоелектрики. Застосування в електро-біотехнології кімнатних рослин і зовнішніх рослин європейського регіону в приміщеннях та *in situ*, і зокрема, морозостійких посухотолерантних рослин, мохів, використання лісових, паркових, садових та сільсько-господарських культур, рослин на техногенно забруднених ділянках та перспективи їх застосування в країнах з суворим кліматом є малодослідженим питанням та представляє значний інтерес для розвитку та вдосконалення біотехнології отримання рослинно-мікробної біоелектрики.

Отже, рослини і бактерії є визначальними біологічними компонентами електробіосистем, продуктивність яких тісно взаємопов'язана із типом і складом середовища. Незважаючи на десятки досліджень в цій галузі залишається ще багато нез'ясованих питань, зокрема бактеріального електрогенезу, ролі сульфатредукторів в генерації біоелектрики, ролі виду рослин в електропродуктивності, малодослідженим є ефективність електро-біосистем, базованих на незаболочених природних середовищах. Крім цього, до цього часу особливо мало уваги приділялося іншим групам організмів, які окрім бактерій, також присутні в ризосфері, в кореневій зоні рослин, а це еукаріоти: дріжджі і гриби, найпростіші, анеліди та мезо- та макрофауна (Phillips та ін., 2003), які можуть мати важливий вплив на отримання біоелектрики.

Ефективна робота РМФС прямо залежить від ефективного електрогенезу її мікробіому. Мікробна спільнота РМФС є багатовидовою структурою, що включає різні фізіологічні її групи, на яку мають прямий вплив безліч факторів таких як вид рослин, особливості середовища та зовнішні фактори довкілля. Рівень фотосинтетичної активності рослин/екскреції речовин коренями, відповідно, кількість і типи екскретованих речовин, ступінь розвитку кореневої системи, що можуть бути гідролізованими до простих сполук як джерел живлення мікроорганізмів у великій мірі впливають на мікробіом РМФС. Розуміння складного впливу всіх чинників на мікробні взаємозв'язки та формування мікробної спільноти дозволяє створити оптимальні умови для генерації біоелектрики. Ідентифікація мікроорганізмів РМФС, вивчення їх властивостей,

синтрофних кооперацій та конкуренції за донори електронів у мікробіомі та дослідження різних видів рослин як складових компонентів PMFC має значення для пошуку способів оптимізації електробіотехнології. Виявлений ультра-баланс в природніх мікробіомах робить їх вразливою структурою та вказує на важливість врахування і підтримки тонких мікробних взаємозв'язків при оптимізації PMFC. Вдосконалення рослинно-мікробної електробіотехнології можна досягнути шляхом використання стресостійких рослин з потужним ризодепозитом, активно розвинутою кореневою системою, здатних виживати у широкому діапазоні температурних умов, умов вологості та освітлення, стійких до захворювань та налагодженні оптимальних умов як для розвитку рослин, ризодозиції і формування їх кореневої системи, так і електрогенезу мікроорганізмів і мікробного гідролізу рослинних залишків, враховуючи позитивну кооперацію між різними групами мікроорганізмів в процесі генерації біоелектрики PMFC та негативний вплив конкурентних груп мікроорганізмів. Здатність мікроорганізмів та рослин до ремедіації і біосенсорування, декоративність рослин та можливість їх використання як їжі і корму та для зелених дахів додає подвійної цінності PMFC як джерела відновлювальної енергії

1.6 Вплив зовнішніх факторів на генерацію біоелектрики

Зовнішні фактори навколишнього середовища мають вагомe значення для функціонування електро-біосистем, оскільки технологія є рослино-асоційована, і фактори, що позначаються на фотосинтезі, рості рослин та розвитку їх кореневої системи мають прямий вплив на вихід біоелектрики.

Сонячне освітлення як необхідний фактор для розвитку рослин і базовий рушій фотосинтезу має важливе значення для продуктивності електро-біотехнологій та генерації біоелектрики. Сонячна енергія запускає світлову фазу хімічного синтезу АТР та пов'язано з ним темнову фазу фотосинтезу органічних сполук (Rusyn, 2016). Світло веде до зростання фотосинтетичної активності і максимілізує кількість корневих ексудатів, а також, приводить до формування

потужної кореневої системи, самі корені якої при розпаді служать джерелом енергії для целюлозодеградуючих мікроорганізмів, задіяних в електрогенезі та, водночас, активніше виводять органічні субстрати для розвитку інших груп електро-активних мікроорганізмів. Під час світлої фази рослини продукують та виводять більше кисню, що необхідно для катодної реакції ORR (Shen et al., 2018).

Позитивний ефект світла на електропродуктивність показали ще в перших роботах, пов'язаних з дослідженнями PMFC: Стрік та інш. (Strik et al., 2008) продемонстрували, що збільшення інтенсивності світла приводить до максимізації отриманого вольтажу. Каку та інш. (Kaku et al., 2008) продемонстрували, що затінення рослин веде до зниження генерації біоелектрики завдяки інгібуванню фотосинтезу, пов'язаного з ризодепозитом. Це підтверджено і в наступних роботах. Шіранїєєві та інш. (Chiranjeevi et al., 2012) у експериментах з електро-біосистемами на основі рослин *Pennisetum setaceum* виявили на 10% вищу електрогенну активність під час денної роботи, що можна безпосередньо віднести до фотосинтетичної активності рослин. Зв'язок біоелектрикопродуктивності систем із рівнем освітлення, розвитком рослин та рівнем їх фотосинтетичної активності показано теж в роботах з *Lemna minuta* та *Canna indica* (Hubenova & Mitov, 2012; Lu et al., 2015). Низьке освітлення зменшує інтенсивність фотосинтезу і синтезу органічних сполук, відповідно знижується їх надлишок і секреція в ґрунт, що приводить до сповільнення розвитку мікроорганізмів та ослаблення генерації ними сили струму. Проаналізувавши вплив чотирьох типів фотоперіодів на генерацію біоелектричного потенціалу: 24/0 год, 16/8год, 9/15 год, 0/24 год, Кудзарі та інш. (Khudzari et al., 2018) показали, що отримувана потужність біоелектрики найвища в перших двох випадках, коли освітлення найбільш тривале і є зниженою в останніх двох, коли час освітлення невеликий. Циркадний цикл із зниженням вночі біоелектричних показників та їх зростанням вдень був показаний також Азрі та інш. і Тоу та інш. (Azri et al., 2018; Tou et al., 2019).

Але одночас, вивчено кілька електро-біосистем, функціонування яких незалежне від освітлення та фотосинтезу (Timmers et al., 2012; Moqsud et al., 2015;

Wetser et al., 2015b; Wang et al., 2017; Sarma et al., 2018). Такі PMFC використовують як субстрат не фотосинтетанти, а рослинний опад, відмерле коріння, а, можливо, і свіжий листяний опад, який суттєво підвищує вміст органічних сполук у ґрунті (Chow, 2006; Chow et al., 2013). Робота PMFC напряду залежить від рослин і, як показано в роботі Губенової та Мітова (Hubenova & Mitov, 2012) сила струму зменшується при загибелі рослин.

Тим не менше, визначення оптимальної кількості освітлення для нагромадження ризодепозиту і формування кореневої системи є факторами, які мають бути детально вивчені в рамках розвитку рослинно-мікробної біоелектротехнології.

Температура має вплив на продукування біоелектрики. Температура, як один з основних факторів, регулюючих інтенсивність фотосинтезу (Ashraf & Harris, 2013), відтак має важливе значення і для ефективності функціонування електро-біосистем. Швидкість фотосинтезу, ріст рослин, біомаса ризосфери зростає із ростом зовнішньої температури через інтенсивнішу активацію ензиматичних реакцій та при досягненні певної межі репресується при подальшому зростанні температури (Song et al., 2014). Із зниженням температури і сонячного випромінювання в зимовий період рослина вступає у відпочинковий період, коли ріст рослин, поділ меристеми і їх метаболізм та фотосинтез сповільнюються (Gupta et al., 2016; Tou et al., 2019). Крім того, температура є лімітуючим фактором для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів та синтрофно пов'язаних з ними ґрунтових мікроорганізмів. Оптимальний температурний інтервал для функціонування біоплівки, сформованих мікроорганізмами, від 5°C до 45°C (Patil et al., 2010). Біоплівки, вирощувані при вищих температурах електрохімічно більш активні, ніж культивовані при нижчих температурах (Aelterman et al., 2006; Patil et al., 2010). Водночас, температурний оптимум може істотно відрізнитися від середньо статистичного і є індивідуальним для різних екосистем, рослин та мікробіомів, що можуть виживати навіть в екстремальних умовах.

Дай та інш. (Dai et al., 2015) в процесі досліджень в сезонно затоплюваних лісах, прісноводних кипарисово-тупелових заболоченнях, Південної Кароліни,

США, що є одною з небагаточисельних робіт по вивченню електро-біосистем *in situ*, виявили, що вихід струму є температурозалежним процесом, окрім періодів сильних злив чи засух, коли інші фактори стають лімітуючими - вихід струму зростає із зростанням температури середовища. Весною, коли температура поступово піднімалася, зростала і кількість продукованої біоелектрики (Dai et al., 2015). Так само, і лабораторні PMFC є високо температурочутливими (Dai et al., 2015). Подібно до отриманих попередніх результатів, електрогенна активність *Chlorophytum*-PMFC у горщиках, в температурних умовах Алгерії, Північна Африка була пропорційна температурі (Tou et al., 2019): максимум біоелектричного потенціалу відкритого кола, 960 мВ, був зафіксований у липні-вересні, коли середня температура була на рівні 30°C одночасно разом з найвищим рівнем сонячної радіації, в той час як у місяці з температурами 15 - 28°C та нижчими значеннями сонячного освітлення біоелектричний потенціал відкритого кола становив лише близько 335 мВ, а у зимовий період, коли температура не перевищувала 15°C та сонячне випромінювання було ще нижчим разом з тим зафіксовано і відносно низький потенціал від -70 мВ до 280 мВ.

Критичність температури нижче 10°C для функціонування електро-біосистем описана Хонг та інш. (Hong et al., 2009) в лабораторних тестах з MFC та Даї та інш. (Dai et al., 2015) *in situ* з PMFC, які показали зниження електропродуктивності систем в цих умовах. Низькі мінусові температури лімітували функціонування електро-біосистем та вели до вимерзання рослин *Spartina anglica* в кліматичних умовах датської зими на дахах (Helder et al., 2013b). Роботи Даї та інш. і Хелдер та інш. (Dai et al., 2015; Helder et al., 2016) показали зниження струму до 0 при опусканні температури до 0°C. При падінні температури нижче точки замерзання, утворення льоду блокує передачу заряду, заморожуючи воду на катодній поверхні (Dai et al., 2015). Тривала дія морозів приводила до зниження струму на 42 - 50 % на дахах (Helder et al., 2016), що автори пояснюють пошкодженням біоплівки, оскільки, коли електро-біосистему повернули назад в умови її температурного оптимуму 35°C, виробництво біоелектрики було зниженим і далі. Подібні результати зниження сили струму

після тривалих морозів на 45 – 67% були зафіксовані на зелених дахах (Helder et al., 2013b), що автори пояснюють як пошкоджуючим впливом морозів на біокомпоненти технології, так і зниженою кількістю сонячного освітлення. *Очевидно, конструкція PMFC-контейнерів, застосованих на дахах потребує термоізоляції чи використання конструкцій з великою кількістю ґрунту, попередження вимерзання мікроорганізмів та рослин, як це відбувається в природних умовах, де не зафіксованого незворотнього ефекту мінусових температур (Dai et al., 2015), а також, підбору морозостійких рослин для PMFC-технології.*

*Вологість середовища, як важливий фактор для розвитку і рослин, і мікроорганізмів, є важливим і для функціонування рослинно-мікробних електро-біосистем та має вплив на отримання біоелектрики. Вологість активізує, як фотосинтез та кореневу ексудацію, так і розвиток електрико-генеруючих мікроорганізмів. Окрім цього, вода є важливим комутатором у біотехнології збору біоелектрики, а висушений субстрат роз'єднує PMFC коло. Дошова вода розчиняє та концентрує поживні речовини, створюючи високу концентрацію органічних речовин (Chow, 2006; Chow et al., 2013), що є субстратами для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів. Проте досліджень впливу вологості на електропродуктивність рослинно-мікробних електро-біосистем є небагато, оскільки більшість робіт у сфері PMFC проводились у лабораторних умовах з регулярним щоденним поливом або в заболочених середовищах, де зміна вологості є незначною. Dai та інш. (Dai et al., 2015) *in situ* показали вагомий вплив сезонних змін вологості середовища на зміну сили струму електро-біосистем: під час засушливого періоду, із липня по листопад, біоелектрика практично не продукувалась і лише пульсуюче зростала під час дощів, а під час дощового періоду, що супроводжувалося тривалим затопленням електро-біосистем, протягом травня – листопада, сила струму істотно зростала протягом перших місяців та знижувалася в останні два місяця затоплень, очевидно, лімітуючись температурою та вмістом поживних речовин. На початку кожного дощу сила струму швидко зростала впродовж перших годин зливи (Dai et al.,*

2015). Проблема впливу зміни вологості на електропродуктивність рослинно-мікробних електро-біосистем в інших екосистемах залишається маловивченим.

Рівень сонячного освітлення, температури середовища і вологості мають важливе значення для функціонування рослинно-мікробних електро-біосистем. Водночас, діапазон оптимуму зовнішніх факторів істотно відрізняється і є різним для різних видів рослин та мікробіомів та екосистем, робіт по вивченню впливу факторів довкілля на функціонування електро-біосистем є небагато, що потребує поглибленого деталізованого вивчення для забезпечення ефективної та стабільної роботи електробіотехнологій як в умовах будинків, так і *in situ* в різних кліматичних регіонах.

1.7 Практичне застосування біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики

Біотехнологія отримання рослинно-мікробної біоелектрики є екологічно чистою, вуглець нейтральною без будь-яких викидів, що має великі перспективи застосування: в смарт-містах та селах, на зелених дахах і у зелених будинках, в агроекосистемах та заболочених місцевостях. В 2008 р. Стрік та інш. (Strik et al., 2008) розраховали середню теоретично можливу енергоефективність біотехнології для Північно-Європейських країн, ґрунтуючись на рівні сонячного випромінювання в Північній Європі 150 Вт/м^2 (Loster, 2006), середній ефективності фотосинтезу 2.5% (Taiz et al., 2006), виході ризодепозиту 40 % (Lynch & Whipps, 1990), доступності кореневого депозиту для мікроорганізмів на рівні 30 % (Minchin & McNaughton, 1984), 29 % регенерації енергії мікробних паливних елементів (Ter Heijne et al., 2006) на сезон експлуатації 6 місяців. Рослинно-мікробна електро-біотехнологія може продукувати $21 \text{ ГДж/га}\cdot\text{рік}$ ($5800 \text{ кВт}\cdot\text{год/га}\cdot\text{рік}$), що є на рівні інших традиційних джерел (Strik et al., 2008). 100 м^2 рослинно-мікробних електро-біосистем достатньо для енергозабезпечення потреб цілого будинку, що споживає $2800 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$ (Strik et al., 2011).

Технологія PMFC може бути інтегрована (рис 1.1.1)

- у заболочені рисові поля (De Schamphelaire et al., 2008, Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010),
- болотисті солончаки, торф'яні болота та інші водно-болотні угіддя (Wetser et al., 2017), затоплені ліси (Dai et al., 2015),
- у високо технологічні середовища на зелених дахах (Helder et al., 2013b, Taria et al., 2018),
- системи очищення побутових та промислових стічних вод та забруднених поверхневих вод та ґрунтів (Venkata Mohan et al., 2011; Klaisongkram et al., 2015; Habibul et al., 2016; Moqsud et al., 2017; Wang et al., 2017; Saz et al., 2018; Shen et al., 2018; Oodally et al., 2019; Yang et al., 2019).
- а також, у садовий ґрунт кімнатних та декоративних рослин (Chiranjeevi et al., 2012, Khudzari et al., 2018; Sarma et al., 2018; Tou et al., 2019; Gomora-Hernandez et al., 2020), де існують необхідні аноксидні анодні умови.

Перспективи PMFC на заболоченнях є багатообіцяючими. Дослідження електропродуктивності екосистем найбільше проведено на заболочених територіях як аноксигенних та найбільш електропровідних. Маштаб заболочених місцевостей у світі є досить істотним і складає близько 15 – 16 млн. км² (Lehner & Doll, 2004; Davidson & Finlayson, 2018), тому їх потенціал використання для генерації біоелектрики представляє великий інтерес. Теоретичні розрахунки енергоефективності проведені на болотах і торфовиськах Нідерланд підтверджує масштабність перспектив боліт як джерела рослинно-мікробної біоелектрики (Wetser, 2016). Виходячи з теоретичних розрахунків рослинно-мікробні електробіосистеми усього соленого болота в Оостерсшелде у Нідерландах (Oosterschelde, Netherlands) площа, якого в 2014 році становила 390.9 га і, де широко-поширеним видом є *Spartina anglica*, модельний об'єкт PMFC технології, можуть генерувати 1.3 МВт чи 11.6 ГВт·год/рік (Wetser, 2016). Середньостатистично людина використовує 1393 кВт·год/рік, виходячи із енергоспоживання середнього домогосподарствами 3500 кВт·год/рік та середнього розміру сім'ї 2.19 осіб (Wetser, 2016). Таким чином, електробіотехнологія заболоченого солончака Оостерсшелде може покрити повністю споживання електроенергії 8360 осіб, що

може становити село середнього розміру, як наприклад, Єрсеке (Yerseke) з 6670 осіб, що розташоване неподалік цього солоного болота (Wetser, 2016). Якщо ж, Оостершелде використовуватиме на додаток до PMFC технології біотехнологію SMFC (Sediment Microbial Fuel Cell, седиментний мікробний паливний елемент): опалу біомасу фітопланктону, водоростей як донори електронів, електро-біосистеми усїєї площі болота можуть генерувати ще більше біоелектрики і покривати енерговитрати 279 835 осіб, така кількість населення складає 75% населення цілої провінції Нідерланд, Zeeland (Wetser, 2016).

Електро-біосистеми у торф'яних заболоченнях в національних парках можуть стимулювати екотуризм (Wetser, 2016). Для прикладу, Алде Феанен (Alde Feanen), національний парк на півночі Нідерландів майже оповністю вкритий торф'яними болотами, з яких 223 га займає очерет звичайний *Phragmites australis*, досліджуваний Ветсер та інш. (Wetser et al., 2015b) як біокомпонент PMFC технології. PMFC, застосований у торф'яному заболоченому ґрунті із очеретом в національному парку теоретично міг би генерувати 10 ГВт·год/рік на основі прогнозованої генерації біоелектроенергії з PGA (Plant Growth Area), площі, де ростуть рослини (Wetser et al., 2015b) чи 2.5 ГВт·год/рік з поправками на існуючі технологічні ускладнення (Wetser, 2016). Біоелектрика, генерована рослинно-мікробними електро-біосистемами, могла би слугувати потребам туристів. Рекреація в національного парку Алде Феанен (Alde Feanen) у великій мірі заключається в прогулянках на човні та велосипедах серед торф'яних заболочень. Місцеве самоврядування стимулює використання електричних засобів пересування. PMFC біотехнологія могла б забезпечити заряджання електрокатерів та електровелосипедів у громадських пунктах зарядки національного парку, і таким чином підтримати використання поновлюваної електроенергії (Wetser, 2016).

Важливість водно-болотних угідь часто недооцінюються у світі. Їх важливі біологічні та гідрологічні функції, такі як середовище існування птахів та тварин і підтримка харчового ланцюга, захист берегової лінії, підзарядка ґрунтових вод, захист від повеней і покращення якості води, ігноруються (Conner et al., 2007;

Reddy & DeLaune, 2008; Wetser, 2016). Болота осушуються для перетворення на сільсько-господарські землі для культивування агрокультур, руйнуючи біорізноманіття та завдяючи шкоди природі. І, незважаючи на їх важливу роль, близько 30 – 33% водно-болотних угідь у світі були втрачені станом на 2009 рік через діяльність людини (Dixon et al., 2016; Hu et al., 2017). Вагома перспектива використання водно-болотних угідь в якості джерела біоелектрики надає додаткову цінність болотам, що збільшує їх значення. Це може призвести до зниження масштабів осушення і перетворення водно-болотних угідь і, таким чином, їх збереження (Wetser, 2016). PMFC технології також можуть знижувати викиди парникового газу метану в заболочених місцевостях, оскільки 32% світової емісії метану припадає на болота (Ciais et al., 2014). При інтродукції в ґрунт електродних систем активніше розвиваються електроактивні мікроорганізми конкуруючи з метаногенами (Wetser, 2016).

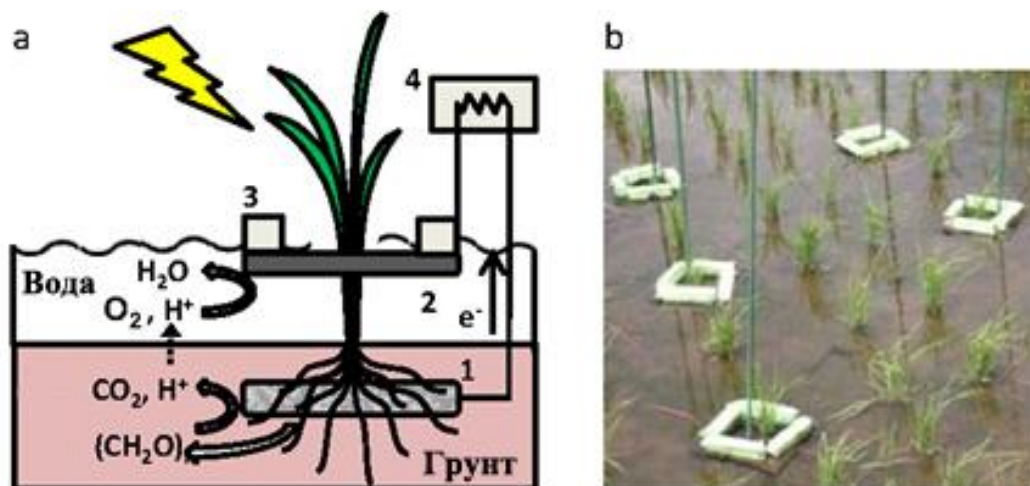


Рис.1.7.1 Конфігурація систем PF-MFC, що використовуються на рисових полях (Kouzuma et al., 2014): (а) Схематична ілюстрація положення електродів та можливих хімічних реакцій в межах PF-MFC: 1 – анод; 2 – катод; 3 – плавець, прикріплений до катода; 4 – реєстратор даних для вимірювання напруги через резистор; (б) PF-MFC відразу після трансплантації у рисове поле.

Рис є одною з найважливіших агрономічних рослин у світі та займає 143 млн. га заболочень для свого вирощування, тому майбутній внесок

електро-біосистем, інтродукованих у рисові заболочені поля є досить вагомим у розв'язання глобальної енергетичної проблеми (Watanabe & Nishio, 2010). Випробування *Oryza sativa*-PF-MFC *in situ*, які генерують близько 80 мВт/м², демонструють перспективність рисових полей для збирання прихованої енергії природи (Kouzuma et al., 2014). Конфігурація PF-MFC (Paddy-Field MFC), мікробних паливних елементів рисових полів представлена на рис. 1.7.1.

В багатьох лабораторіях світу працюють над можливістю застосування мікробно-рослинних електро-біосистем для очищення відходів. Науковці з Пакистану (Saba et al., 2019) представили PMFC технологію, що може одночасно використовуватися для фіторемедіації та отримання біоелектрики на стічних водах чи забруднених водоймах. Фітоенергетичні системи встановлені у водно-болотних угіддях стабільно збирали електроенергію від анаеробного дихання ризосферних бактерій. Вивільнені бактеріальними біоплівками електрони електрохімічно взаємодіють з аеробним катодом, що є акцептором електронів (рис. 1.7.2). Одночасно електро-біосистема очищує довкілля: мікроорганізми, використовуючи для свого розвитку поживні речовини, редукують їх вміст у водоймі, чим попереджують надмірний розвиток водоростей, так зване її «цвітіння», а рослини акумулюють розчинені у воді полютанти та очищують повітря.

В Філіпінах в 2018 році Памінтуан та інш. (Pamintuan et al., 2018) презентували PMFC, на основі водного гіацинту *Eichhornia crassipes* та бактерій, що генерувала до 860 мВт/м² та одночасно усувала з води нікель, накопичуючи важкий метал у корінні рослин. Оадали та інш. (Oodally et al., 2019) у Південній Африці розробили PMFC на основі водної рослини папірису *Cyperus prolifer*, що генерує 229 мВт/м² та одночасно усуває з стічних вод органічні сполуки, сполуки фосфору та амонію. Янг та інш. (Yang et al., 2019) запропонували PMFC на основі півників болотяних *Iris pseudacorus* для ефективного усунення амонію з стічних вод, що одночасно продукує 25.14 мВт/м².

Використання PMFC на *зелених дахах* представлено в небагаточисельних роботах. Пілотні дослідження на даху Інституту екології у Вагенігені, що у

Нідерландах (Dutch Institute for Ecology in Wageningen, Netherlands), на площі 15 м² вперше показали можливість та перспективність отримання біоелектрики на зелених дахах (Helder et al., 2013a; Helder et al., 2013b). Отримувана потужність енергії становила близько 440 мВт/м² в лабораторних зразках та 222 мВт/м² на дахах. 92 мВт/м² генерували *Sedum hybridum*-PMFC-реактори, призначені для зелених дахів, в лабораторних умовах та 116 мВт/м² на 4 м² зеленого даху в пілотному експерименті в Чілі, Південна Америка (Taría et al., 2017; Taría et al., 2018). Таріа та інш. (Taría et al., 2018) продемонстрували перспективи PMFC на зелених дахах в ролі дешевих біосенсорів рівня вологості. Було встановлено лінійну позитивну залежність між генерацією струму PMFC-реакторів та рівнем вологості у субстраті. В напівпосушливому кліматі особливо важливим є ефективне використання води. Постійне спостереження за вологістю зелених дахів за допомогою датчиків води забезпечує ощадливе використання цього критичного ресурсу (Taría et al., 2018). Використання традиційних датчиків води потребує 400 – 1800 US\$, що робить це застосування менш привабливим, як приватно, так і комерційно, в той час як PMFC-сенсори води є дешевою альтернативою на застосування на зелених дахах.

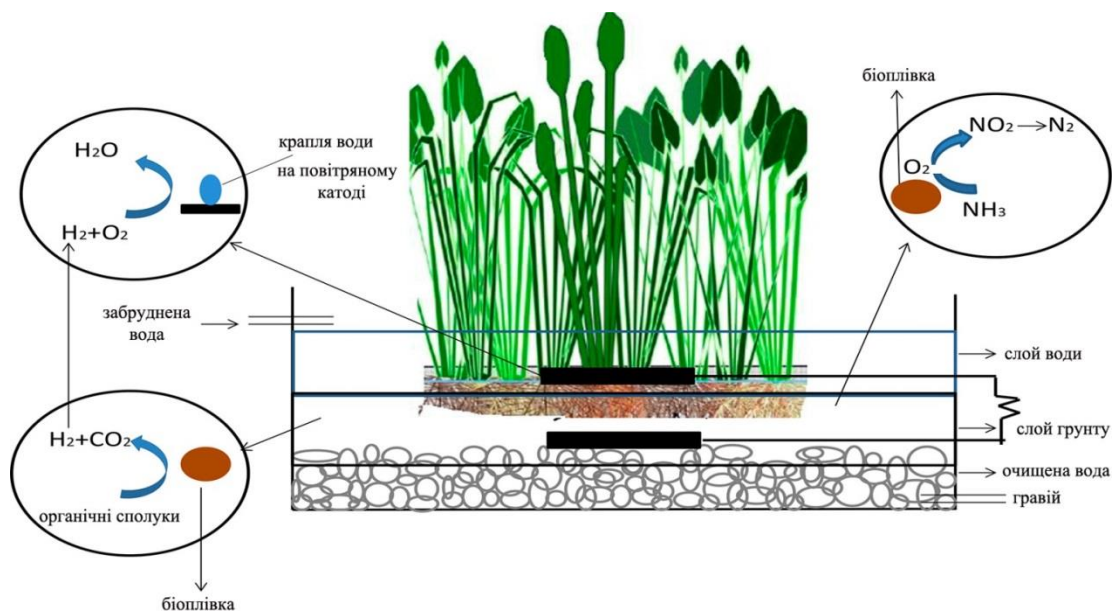


Рис. 1.7.2 Мікробна фітоенергетична біосистема для отримання біоелектрики та одночасного очищення стічних вод (Saba et al., 2019)

Зелені поверхні дахів є екологічним інструментарієм у боротьбі із зміною клімату. Зелені дахи безпосередньо впливають на мікроклімат будинків, термоізолюючи їх (Theodosiou, 2003; Konyuhov et al., 2019), чим скорочують CO₂-пов'язані енерговитрати на їх кондиціонування та обігрів (Oberndorfer et al., 2009; Castleton et al., 2010; Berardi et al., 2014), редукують міський острів тепла, що приводить до загрозованої спеки (Alexandri & Jones, 2006; Lehmann, 2014), фільтрують забруднене повітря (Yang et al., 2008), знижують концентрацію парникових газів (Dimitrijevic et al., 2018), а також, протидіють затопленням під час сильних опадів, поглинаючи дощову воду (Mentens & Hermy, 2006; Berndtsson, 2010), створюють нові природні середовища існування та збільшення біорізноманіття (Brenneisen, 2006). Робіт по вивченню застосування PMFC-систем на дахах є поки що небагато, напрям є інноваційним і лише розвивається. Можливість використання зелених дахів як джерела біоелектрики, створення дешевих PMFC-сенсорів для зелених дахів, що енергозабезпечуються самою рослинністю, дозволяючих ефективніше експлуатувати зелені дахи, додають нової цінності зеленим дахам, стимулюють їх ширше використання, що має важливе екологічне значення.

Розробки PMFC на основі декоративних кімнатних рослинах представляють значний інтерес. Останнім часом з'являються перші роботи про можливість використання кімнатних рослин для генерації біоелектрики (Gomora-Hernandez et al., 2020), які могли би стати альтернативними джерелами електрики у зелених смарт-будинках. В 2020 році група науковців Чанг та інш. (Chang et al., 2020) з Малайзії експериментально показали приховані механізми функціонування ґрунтової PMFC. Вони продемонстрували пряму залежність між споживанням рослинами CO₂, появою рослинних виділень у ґрунті, які є субстратом для розвитку мікроорганізмів, бактерійним ростом та генерацією біоелектрики на моделі PMFC-технології у ґрунті, базованій на тропічній рослині *Pandanus amaryllifolius* в лабораторних умовах. PMFC модель мала наступну будову. Камера, що виробляє біоелектрику, представляла собою пластикову пляшку,

об'ємом 5 л, в яку була поміщена внутрішня пірамідальна посудина для 1600 см³ ґрунту (рис. 1.7.3). Її дно було перфороване для відтіку надлишку води. У ґрунт на дні під коріння рослини горизонтально був поміщений анод та вертикально катод. Як електроди використано графітові палички довжиною 10 см та діаметром 1 см. Графітовий катод був загорнутий в целюлозну мембрану. Кожен електрод був зв'язаний з одножильним 0.6 мм мідним дротом. Для замкнення кола підключений 1 к Ω резистор. Електро-біосистема працювала протягом 120 годин. Вже через 5 діб у ґрунті за допомогою високо-афінної рідинної хроматографії виявлені продукти фотосинтезу рослин: карбонові органічні кислоти, яких не було на початку експерименту, в основному, був виявлений ацетат (Chang et al., 2020). Разом з тим, за допомогою скануючої електронної мікроскопії був продемонстрований розвиток бактеріальних колоній біоплівки на аноді та у ґрунті довкола аноду.

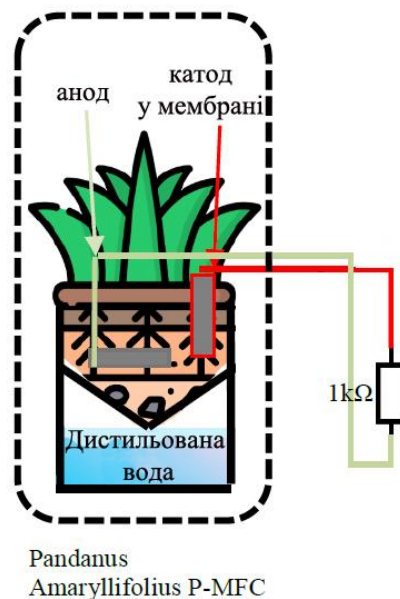


Рис. 1.7.3 Схема *Pandanus amaryllifolius* ґрунтової PMFC, на якій було показано прямий зв'язок між рослинним фотосинтезом і секрецією ацетату у ґрунт та розвитком бактеріальної плівки на аноді і довкола у ґрунті та генерацією біоелектрики (Chang et al., 2020)

Використання рослинно-мікробної біоелектрики у приміщеннях для енергозабезпечення побутових потреб є малодослідженим питанням та потребує детального вивчення. За зеленими будинками майбутнє і ключова роль у вуглець-нейтральних енергоефективних та смарт містах (Lytvyn et al., 2019; Lytvyn et al., 2020; Lytvyn et al., 2020).

Описані вище експерименти показали перспективність РМФС технології для її застосування у заболоченнях і зелених дахах, для вирощування рису і в процесі очищення стічних вод та розробили прототипи електро-біосистем, які потребують вдосконалення для масштабного застосування шляхом селекції енергоефективних рослин, середовищ, матеріалів електродів і їх конструкцій та підбору умов функціонування, створюючи електро-біосистеми, що ефективно працюють *in situ* у відповідних специфічних умовах посух чи затоплень, спеки чи морозів, характерних для певного регіону та в умовах енергоефективних будинків.

Незважаючи на існуючі проблеми РМФС-електробіотехнології, є *ряд демонстрацій практичних впроваджень* та застосувань рослинно-мікробної біоелектрики, поки що *для низько-енергоємних потреб*, таких як

- LED-освітлення (Schultz, 2014; Lu et al., 2015; Schievano et al., 2017);
- енергоживлення бездротових метеодатчиків і метеосенсорів (Bombelli et al., 2016; Brunelli et al., 2017), сенсорних систем IoT-WSN (de la Rosa et al., 2019);
- підзарядки радіо і мобільного телефону (Bombelli et al., 2016; Gomora-Hernandez et al., 2020).

Альтернативні саможивлячі себе системи енергозабезпечення відіграють вирішальну роль у швидшому розвитку сучасних технологій смарт-міст, автономних бездротових сенсорних мереж, IoT технологій, найсучасніших електроприладів, біосенсорів (Zanella et al., 2014; Sheng et al., 2015; Wu et al., 2018; Shi et al., 2018; Lytvyn et al., 2019; Rosa et al., 2019). В цьому контексті, рослинно-мікробна біоелектрика має важливе значення як альтернативна само підтримуюча енергосистема. На сьогоднішній момент само підтримуючі системи запасують

енергію вітру, сонячного світла та руху з метою забезпечення безперебійного постачання енергії (Jung et al., 2014; Suarez et al., 2016). Однак ці енергозбиральні технології на основі факторів навколишнього середовища, сонячного світла та вітру чи п'єзо-руху системи навряд чи доступні в приміщеннях (Rosa et al., 2019). Рослинно-мікробні електро-біосистеми представляють собою зручне пристосування для збору енергії і в приміщенні, і на вулиці. PMFC-енергобіотехнологія використовує природний ландшафт того місця, де її має бути застосовано, чи, навпаки, потребує озеленення урбанізованих ділянок, наприклад, створення зеленої стіни, чим одночасно покращує міське середовище. Одним з головних обмежень PMFC-енергозапасаючих систем є робота при низькій вхідній напрузі та при низькій потужності повністю автономно і без акумулятора (Rosa et al., 2019).

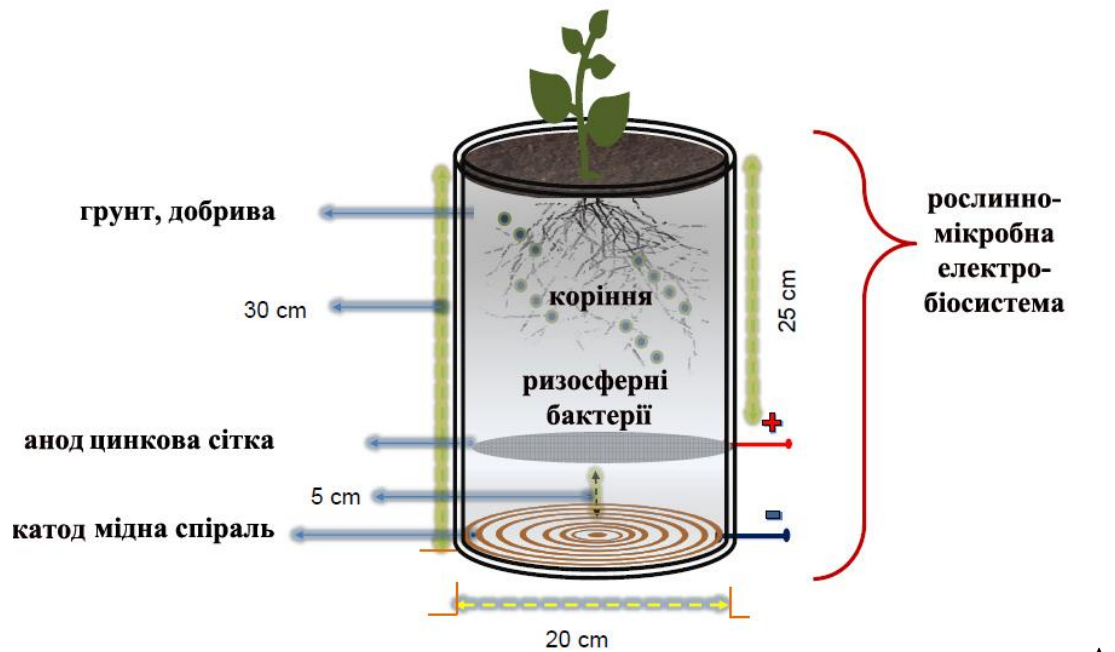
В 2014 році у Нідерландах в Амстердамі засвічено 300 придорожніх світлодіодних лампочок, використовуючи лише електрику, добуту з рослинно-мікробних електро-біосистем (Schultz, 2014). PMFC біоелектрика може забезпечувати освітлення парків та рекреаційних зон (Lu et al., 2015).

Брунеллі та інш. (Brunelli et al., 2017) розробили сенсор для вимірювання вологості, освітлення, температури, що живиться біоелектрикою ґрунтових бактерій, поєднаних з розвитком рослин, який передає вимірювану інформацію бездротово на комп'ютер чи мобільний телефон (метеорадіосенсор).

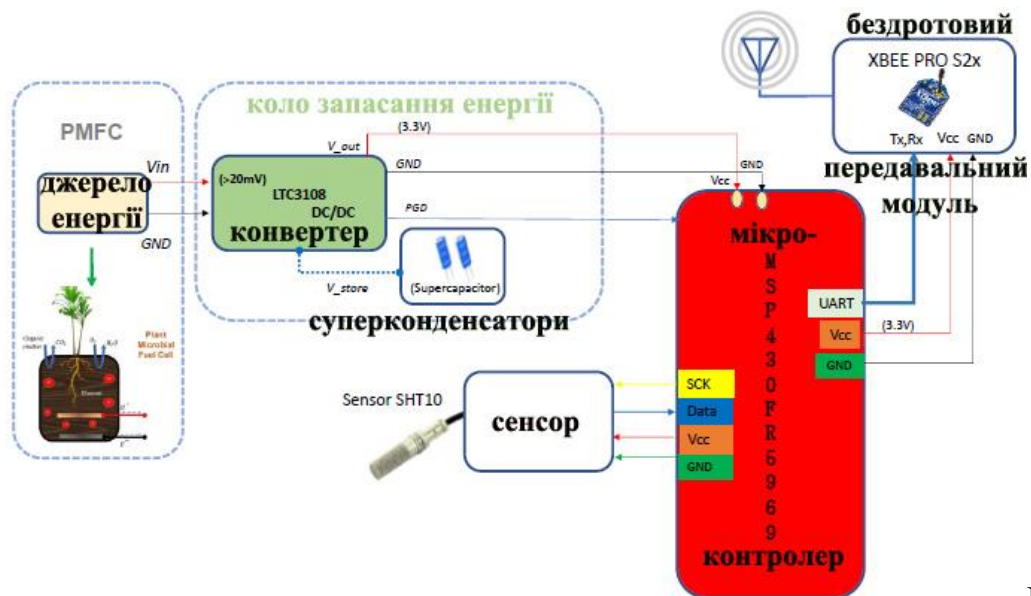
Група науковців з Мексики де ла Роса (de la Rosa et al., 2019) адаптували рослинно-мікробний паливний елемент для живлення *IoT-WSN*. Бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks, WSN) на базі технології Інтернет речей (Internet of Things, IoT) складаються з мініатюризованих сенсорів, розподілених в зоні збору даних, таких як температура, солоність, вологість, водний стрес. Однією з головних проблем цієї технології є розробка адекватної системи енергозабезпечення. Традиційні системи IoT-бездротові сенсорні мережі, працюють на батареях і акумуляторах та потребують їх регулярної заміни, що становить серйозну небезпеку для навколишнього середовища, крім того, процес заміни може бути важким або і неможливим (de la Rosa et al., 2019). Розроблена

ними система PMFC енергоживить сенсор IoT-WSN, що споживає 0.35 мА та забезпечує його автономну роботу, обробку і надсилання даних у режимі реального часу.

Електро-біосистема має вигляд циліндра розміром 30x20см, в якому розміщено систему електродів, ґрунт з добривами та висаджено типову для Південно-Східного регіону Мексики рослину *Cordyline fruticosa* (рис. 1.7.4 А).



А



В

Рис. 1.7.4 Схематична будова *C. fruticosa*-PMFC, що забезпечує автономну роботу 0.35 мА-споживаючої IoT-бездротової сенсорної мережі (А); блок-схема PMFC-сенсора (В) (de la Rosa et al., 2019).

Спиральний мідний катод розміщений у ґрунті на дні PMFC, на глибині 30 см, анодом служить сітка з цинку, розміщена на висоті 5 см над катодом, обидва електроди мають округлу форму. *C. fruticosa*-PMFC стабільно генерує в середньому напругу 0.71 В, густина струму 5 мА/см² та густина потужності 3.5 мВт/см² з однієї рослини (de la Rosa et al., 2019).

C. fruticosa-PMFC є зв'язаною з колом запасання біоелектрики, призначеним для накопичення та управління енергією протягом тривалого періоду часу (рис. 1.7.4 В). Конвертер використовує перемикач для відстеження та вилучення максимуму живлення від PMFC, незважаючи на зміни в потужності та динамічній швидкості зарядки, що дозволяє підвищити вхідну напругу для живлення сенсора. Енергія PMFC накопичується в суперконденсаторах, після чого система здатна жити мікроконтролер та його компоненти. Відповідно до рисунку 1.5.4 В при перевищенні напруги 3.3 В, суперконденсатори заряджаються. В системі застосовується стратегія для керування і економного витрачання накопиченої в суперконденсаторному блоці енергії (de la Rosa et al., 2019).



Рис. 1.7.5 Загальний план будови *C. fruticosa*-PMFC для енергоживлення сенсорної системи IoT-WSN (de la Rosa et al., 2019)

Ультра низькоенергоспоживаючий температурний сенсор включає модуль збирання даних і формування сигналу, мікроконтролер та модуль бездротової передачі сигналу. Дані про температуру надходять через інфрачервоний датчик SHT10 (рис. 1.7.4 В, 1.7.5), що може житись від низької напруги та струму у діапазоні 2.4 – 5.5 В, зазвичай, споживаючи 0.9 мА в режимі роботи та максимум 1.5 А в режимі сну. Мікроконтролер теж підтримується низькою енергією, для його функціонування необхідно 1.8 – 3.6 В (de la Rosa et al., 2019). Передавальний модуль забезпечує бездротове підключення до кінцевої точки пристроїв та працює із струмом нижче 1 мА. Автономна робота сенсора досягається завдяки енергоспоживанню лише 1.27 мВт (de la Rosa et al., 2019). Розроблена де ла Роса та інш. електро-біосистема автономно заряджається рослинно-мікробною біоелектрикою та збирає температурні дані з навколишнього середовища, забезпечує хмарне зберігання даних та передачу даних на мобільний телефон чи планшет, де відображається графік температур в реальному часі, температури тижня та температурні дані місяця.

Бомбеллі та інш. (Bombelli et al., 2016) розробили мох-базовані PMFC, так звані Moss-PMFC, що здатні енергоживити звичайне комерційне радіо Sony ICF-S22, Marlin UK та LCD рідкокристалічний екран датчика метеостанції (рис. 1.7.6). Десять послідовно з'єднаних Moss-PMFC одиниць, що генерують в середньому 6.7 мВт/м² та 53 мА здатні зарядити акумуляторну батарею з номінальною напругою 3.6 В. Після 10 годин зарядки акумулятор міг жити радіо протягом приблизно 80 секунд. Винахід дістав назву Moss FM. А для заряджання метеодатчика 10ти мох базованих електро-біосистем були поділені на два лоти по 5ть одиниць. П'ять Moss-PMFC були з'єднані послідовно, два лоти між собою – паралельно (Bombelli et al., 2016).

PMFC-системи як самопоновлювальні енергосистеми мають перспективи застосування для енергоживлення систем моніторингу великої рогатої худоби (Rosa et al., 2019) та медоносних бджіл (Huircan et al., 2010; Meikle & Holst, 2015), автоматизованого поливу (Gutierrez et al., 2014), раннього виявлення шкідників (Srekantha et al., 2017).

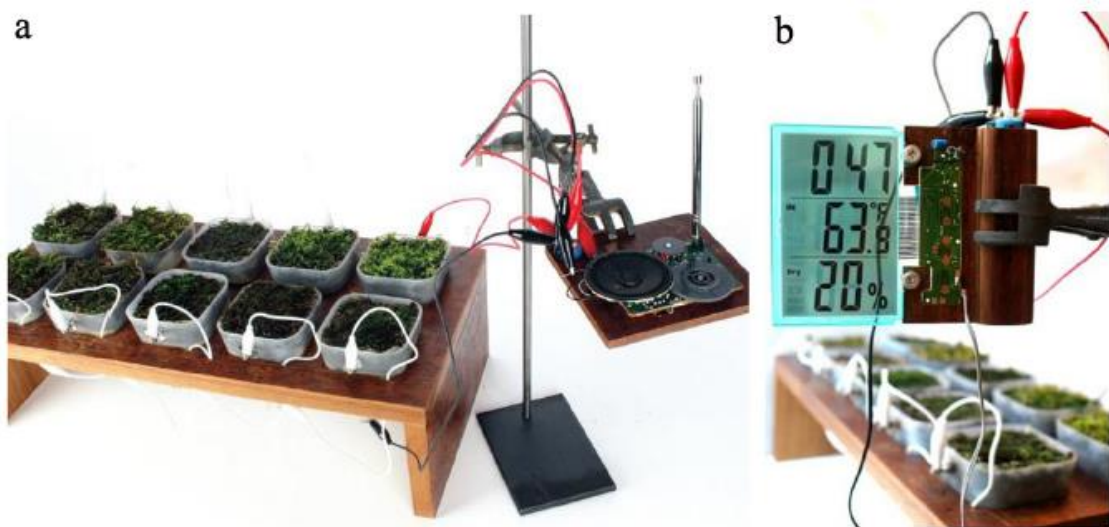


Рис. 1.7.6 Десять з'єднаних електро-біосистем з мохами здатні жити комерційне радіо (a) та LCD метеосенсор (b) (Bombelli et al., 2016)

Гомора-Хернандез та інш. (Gomora-Hernandez et al., 2020) продемонстрували, що енергія, отримана від рослинно-мікробного паливного елемента може використовуватися для живлення електроніки з низьким споживанням, порядку 1.2 В. Електро-біосистеми у горщиках з декоративними рослинами *Agapanthus africanus* у ґрунті з компостом були використані для підзарядки мобільного телефону. В області рослинного коріння горизонтально було розміщено два аноди та один катод на поверхні ґрунту, електроди були представлені вуглецевою тканиною, мідні дроти виходили від анодів через отвори у горщику (рис. 1.7.7). Для отримання енергії, отриманої від РМФС Гомора-Хернандез та інш. було побудовано наступний електронний пристрій, складений двома різними системами: (1) паралельного кола, функція якого зарядити чотири батареї (акумулятори) 1.2 В, використовуючи енергію, отриману від рослин; (2) послідовної схеми, щоб відправити заряд від батарей (акумуляторів) до електронного пристрою низького енергоспоживання, наприклад, до мобільного телефону або світлодіодного освітлювача. Для перемикання між послідовною і паралельною схемами був розроблений перехідник для зміни функціональності електронного пристрою.

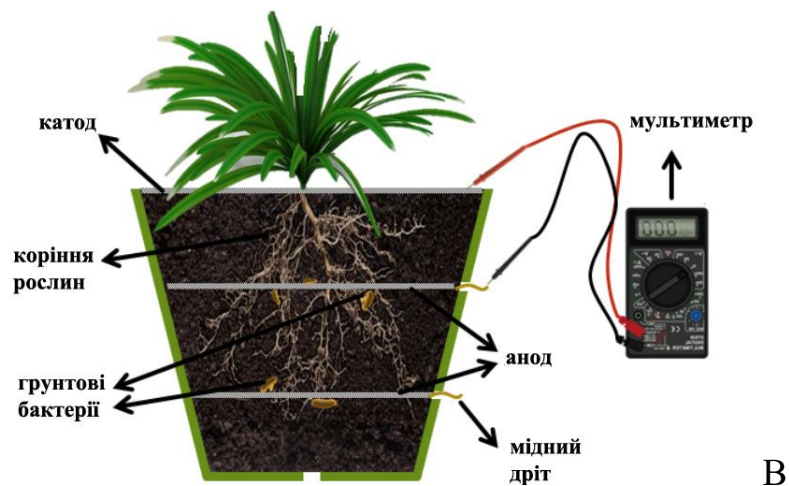


Рис. 1.7.7 Послідовний ланцюг трьох біомодулів *A. africanus*-PMFC, здатний заряджати мобільний телефон (А); будова одного біомодуля *A. africanus*-PMFC (В) (Gomora-Hernandez et al., 2020).

Основна ідея електронного пристрою полягає в скороченні часу завантаження акумуляторів, використовуючи паралельний ланцюг і використанні накопиченої енергії, перемикаючи пристрій на послідовний ланцюг. Три горщики з *A. africanus*-PMFC були з'єднані послідовно (рис. 1.7.7), в результаті чого біоелектричний потенціал зріс з 690 до 1300 мВ, після чого їх поєднали із електронним пристроєм, паралельна схема була активована протягом 3 днів, щоб завантажити заряд. Після цього заряджений електронний пристрій

відокремлювався від PMFC, перемикався на послідовний ланцюг і підключався через USB-порт до розрядженого мобільного телефону (Gomora-Hernandez et al., 2020). Запасена енергія дозволила частково зарядити мобільний телефон. Гомора-Хернандез та інш. пропонують запасати біоелектрику отриману від PMFC також на конденсаторах, як і в роботі Ямасакі та інш. (Yamasaki et al., 2018).

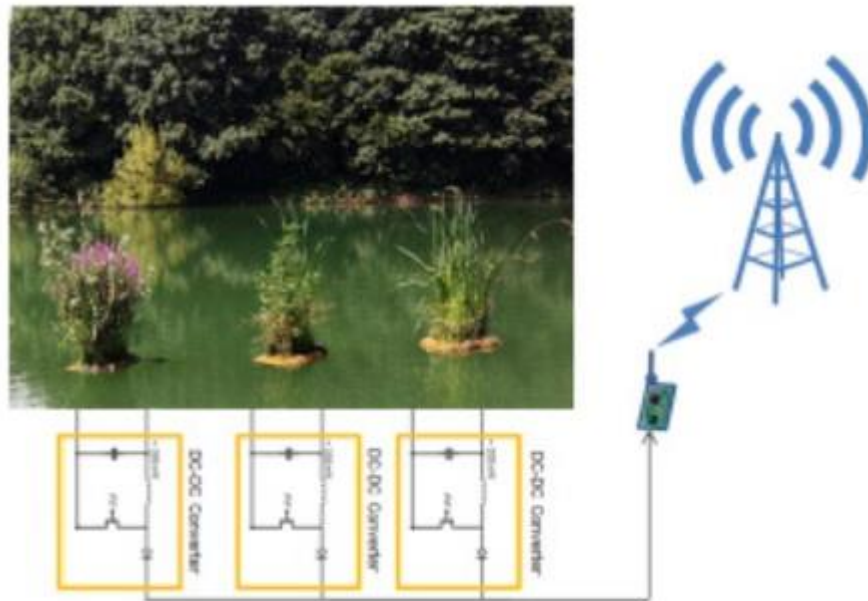


Рис. 1.7.8 Плаваючий сад із fPMFC, що збирає біоелектрику у водоймах та енергоживить світлодіод, сенсор, зумер і передає дані (Schievano et al., 2017).

Цікавою є ідея плаваючих fPMFC (floatingPMFC), так званих плаваючих садів, які можуть збирати енергію у водоймах (рис. 1.7.8), розроблена науковцями в Італії (Schievano et al., 2017). Електробіотехнологія представлена на EXPO2015, що відбулася в Мілані в період з травня по жовтень 2015 року. Деякі з плаваючих садів діяли більше одного року в багатих киснем ставках. Катоди були розміщені на водній поверхні, а аноди закопані в ґрунт водойми, куди були висаджені рослини. Тестовані системи fPMFC з декоративними водними рослинами та рисом *Oryza sativa* за допомогою конвертера постійного струму збирали вироблену енергію, енергоживили переривчасте світлодіодне світло,

сенсор, зумер, конвертер та трансмітер даних, і передавали віддалені дані з низькою швидкістю, в 6 с три повідомлення по 12 біт кожне. Десять працюючих fPMFC генерували потенціал в діапазоні 100 – 800 мВ залежно від застосованого зовнішнього опору. Потужність енергії сягала приблизно 3 – 3.5 мВт, а густина потужності 22 – 28 мВт/м² катода приблизно через 20 – 30 днів від початку роботи. В середньому, щодоби запасалося в межах 10 – 35 мВт/год (Schievano et al., 2017).

Отже, в останні роки представлено перші концепти реального впровадження PMFC технології, серед яких такі цікаві розробки для живлення електроніки з низьким споживанням: *Cordyline fruticosa*-PMFC, що заряджає рослинно-мікробною біоелектрикою температурні сенсорні системи IoT-WSN (Rosa et al., 2019); PMFC метеосенсори (Brunelli et al., 2017; Schievano et al., 2017), Moss-PMFC, здатні енергоживити комерційне радіо і дисплей датчика метеостанції (Bombelli et al., 2016), *Agapanthus africanus*-PMFC, що здатні підзарядити мобільний телефон (Gomora-Hernandez et al., 2020), *Oryza sativa*-PMFC, що забезпечують LED-освітлення (Schievano et al., 2017).

Досвід технології MFC для розвитку біотехнології PMFC є дуже важливим. PMFC, як дочірня технологія MFC, у своєму розвитку використовує досвід останніх досягнень та застосувань технології мікробної біоелектрики та іде в ногу з її інноваційними технологічними розробками. Основною і першою традиційною сферою застосуванням MFC від початку розвитку мікробної електробіотехнології є отримання біоелектрики при одночасному очищенні відходів та сполук мікроорганізмами (Pandey et al., 2016). Дослідження велись як в лабораторному масштабі, так і промисловому, у реакторах об'ємом тисячі літрів (Jiang et al., 2011; Zhuang et al., 2012; Zhang et al., 2013a,b; Feng et al., 2014; Dong et al., 2015). Гі та інш. (Ge et al., 2015) енергією з 100-літрового MFC реактора зарядили зовнішні ультраконденсатори. Проте, незважаючи на багато реальних звітів про впровадження і демонстрацій практичної цінності технології MFC, технологія мікробної біоелектрики отримувала мало інвестицій для широкомасштабного застосування через несерйозне ставлення до неї (Santoro et al., 2017).

Новітній перспективний напрямок застосування MFC полягає у використанні біоелектрики мікроорганізмів для живлення приладів низького енергоспоживання, це напрям, в якому також інтенсивно розвивається технологія PMFC. Даний напрям веде свій відлік з 1984 – 1990 років, коли наукова група Беннетто у Бірмінгемі, Великобританія продемонструвала кілька секундну роботу невеликого моторчика завдяки біоелектриці MFC. В 2000 році у Південній Флориді, США, Вілкінсон представив повноцінного гастробота, що сам підтримував свою роботу (рис. 1.7.9). Він представляв собою однометровий 3-вагонний іграшковий потяг, в якому працював MFC, так званий штучний шлунок, який наповнювався їжею та мікроорганізмами *E. coli*. Бактерії продукували біоелектрику, метаболізуючи глюкозу і таким чином заряджали Ni-Cd акумулятори, що забезпечували роботу двигуна і насосів поїзда.

MFC-базовані роботи, їх розробка та вдосконалення стали предметом досліджень в останні роки у Великобританії. У 2003 – 2010 роках наукова група Ієропулоса та інш. у Брістолі, Великобританії представила роботів, які напругу живляться біоелектрикою мікроорганізмів. Першим мобільним застосуванням MFC як єдиного джерела електрики був робот EcoBot-I, що здійснює фототаксис, рух до світла (Ieropoulos et al., 2003) без будь-яких батарей чи сонячних панелей. Енергозабезпечення робота підтримувало 8 одиниць MFC з фериціанід-базованим катодом, які містили чисті культури кишкової палички *E. coli*, що утилізували глюкозу. Робот EcoBot-I може використовуватися як дистанційний датчик. Наступним поколінням роботів самопідтримуючих свій заряд завдяки біоелектриці мікроорганізмів, з відкритим до повітря катодом є робот EcoBot-II (рис.1.7.10) (Ieropoulos et al., 2005). Крім фототаксичного руху робот EcoBot-II здатний виконувати збір і обробку інформації та бездротову передачу температурних даних без використання хімічних медіаторів, як це було в попередніх моделях. Він енергозабезпечувався біоелектрикою культур змішаного мулу, яким подавали вручну гнилі плоди або мертві мухи (Melhuish et al., 2006).

Проте у цих концептах втручання людини все ж вимагалось для поповнення /заміни хімікатів MFC (Santoro et al., 2017). Першим повністю автономним самопідтримуючим свою роботу є робот EcoBot-III (Ieropoulos et al., 2010).



Рис.1.7.9 Гастроробот, розроблений Вілкінсон (Wilkinson, 2000), джерелом енергії для функціонування якого є біоелектрика *E. coli*: 1 – ультразвукові «очі», 2 – «рот», куди подається поживний розчин з глюкозою для розвитку бактерій, 3 – MFC-реактор, де розвиваються *E. coli*, 4 – двигун гастроробота, 5 – запас батарейок, 6 – помпа для редокс розчину

MFC-базовані сенсори, тобто створення автономного мікробного живлення для бездротових сенсорів для моніторингу за навколишнім середовищем, використання біоелектрики бентосних мікроорганізмів для приладів у водному середовищі є ще одною перспективним напрямком розвитку електро-біосистем, які включає і технологія PMFC. В 2008 році Тендер та інші (Tender et al., 2008) показали можливість бентосного мікробного паливного елемента як альтернативу акумуляторам для низькопотужного живлення метеорологічного буйка, який вимірює температуру повітря, тиск, відносну вологість та температуру води та радіометрично передає дані в режимі реального часу. Донован та інш. (Donovan et al., 2011) розробили MFC технологію для живлення сенсорів з енергоспоживанням 2.5 Вт. Було розроблено системи для енергоживлення мікробною біоелектрикою різного роду сенсорів (Grattieri et al., 2016; Jiang et al.,

2018): підводного ультразвукового сенсора (Donovan et al., 2013), WSN сенсора (Thomas et al., 2013), температурного вай-фай сенсора (Zhang et al., 2011; Khaled et al., 2016).

Пієтреллі та інш. (Pietrelli et al., 2014) показали можливість забезпечення мікробною енергією бездротової мережі сенсорів у ґрунті на основі мікробного паливного елемента новітнього типу, ґрунтового, tMFC (terrestrial Microbial Fuel Cell). Це має важливе значення для розробки наземних систем моніторингу за факторами довкілля, що впливають на розвиток агрокультур. На відміну від PMFC, tMFC вимагає певного рН ґрунту. tMFC, як правило, забезпечує нижчу інтенсивність струму і напругу, ніж необхідну для роботи компонентів бездротової мережі сенсорів. Приймач зв'язку та мікроконтролер управління інформацією вимагають для роботи величини напруженості електричного струму при типовій напрузі 3.3 В. Для досягнення адекватних рівнів струму та напруги Пієтреллі та інш. використали інтерфейсну схему для підвищення рівня напруги та накопичення необхідної кількості струму.

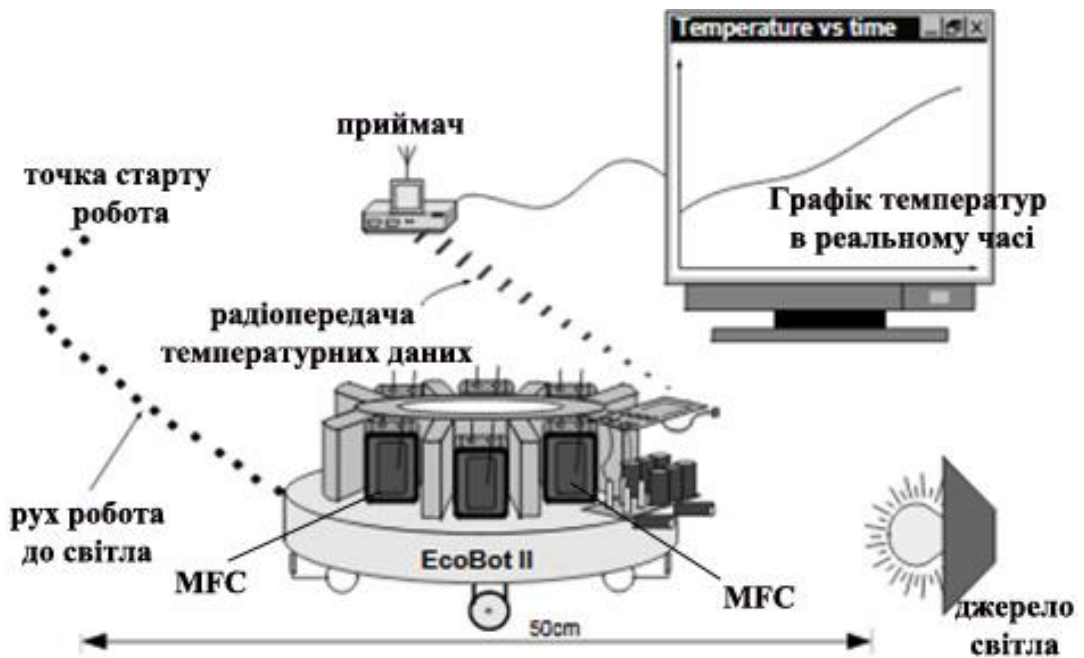


Рис. 1.7.10 EcoBot-II, розроблений Ієропулос та інш. (Ieropoulos et al., 2005), що збирає і передає температурні дані і енергоживиться біоелектрикою мікроорганізмів, самопідтримуючий свій заряд завдяки стекам MFC

Мікробна біоелектрика застосовується для енергоживлення також інших приладів, зокрема, MFC-насосів і годинників. Евінг та інш. (Ewing et al. 2013) показали можливість використання мікробної біоелектрики для енергоживлення повітряного насоса у системах очищення стічних вод для їх аерування та перемішування. Система очищення стічних вод працювала понад рік і виявилася надійною в експлуатації. Папахаралабос та інш. (Papaharalabos et al., 2013) продемонстрували мікробне живлення для цифрового наручного годинника Texas Instruments Chronos у вигляді двох 6.25 мЛ MFC, замінюючих 3 В батарею.

MFC освітлення представляє інший напрям застосування мікробних електробіосистем, над яким працюють і розробники PMFC технології. Гайда та інш. в 2015 продемонстрували керамічні MFC з достатньою потужністю для безперервного енергозабезпечення *LED-світлодіодів* протягом 7 днів (Gajda et al., 2015). Оригінальною є розробка наукової групи Ієропулос та інш. (Ieropoulos et al., 2016), які застосували для *внутрішнього освітлення* біоелектрику Pee Power MFC – урино-MFC, що працюють на сечі (рис. 1.5.11). Перше випробування було проведено в університетському містечку Френчей (Frenchay), що в Брістолі, Великобританії, з лютого по травень 2015 року, де користувачами були викладачі та студенти університету, що продемонструвало можливість застосування модульних MFC для освітлення. Друге випробування було проведено під час музичного фестивалю Гластонбери (Glastonbury Music Festival) в Ворси Фарм, Пілтон (Worthy Farm, Pilton) у червні 2015 року і продемонструвало можливість урино-MFC надійно генерувати електроенергію для внутрішнього освітлення для великої аудиторії близько 1000 користувачів на день. Вихідна потужність, окремого MFC становила 1 – 2 мВт, проте використовувалися 36 MFC модулів, енергоефективність яких була пропорційною до кількості використовуваних одиничних систем MFC (Ieropoulos et al., 2016). Університетське містечко використовувало 12 модулів та 288 MFC, генеруючих 75 – 160 мВт і 400 мВт, коли світло було підключено безпосередньо без суперконденсаторів. Пісуар на фестивалі складався з 432 MFC, генеруючих від 300 мВт (середнє значення) до 400 мВт (максимальне значення) та 800 мВт, коли світло було підключено

безпосередньо без суперконденсаторів. Вихід мікробної енергії залежав від кількості користувачів та температури довкілля. В 2018 році Волтер та інш. представили вдосконалену модель Pee Power MFC, що виробляє орієнтовно на 30% більше енергії при скороченні загальної об'ємної площі на третину, досягнувши максимального значення 600 мВт, що відповідає 7-кратному технологічному удосконаленню (Walter et al., 2018). Pee Power MFC дозволяють одночасно отримувати біоелектрику та утилізувати сечу. У контексті санітарії та охорони здоров'я незалежне джерело живлення, яке використовує відходи є надзвичайно важливим як у країнах, що розвиваються, так і в розвиненому світі (Ieropoulos et al., 2016). Використання урино-MFC є доцільним у віддалених місцях, де відсутні системи каналізації, для прикладу, кемпінги, Національні парки.

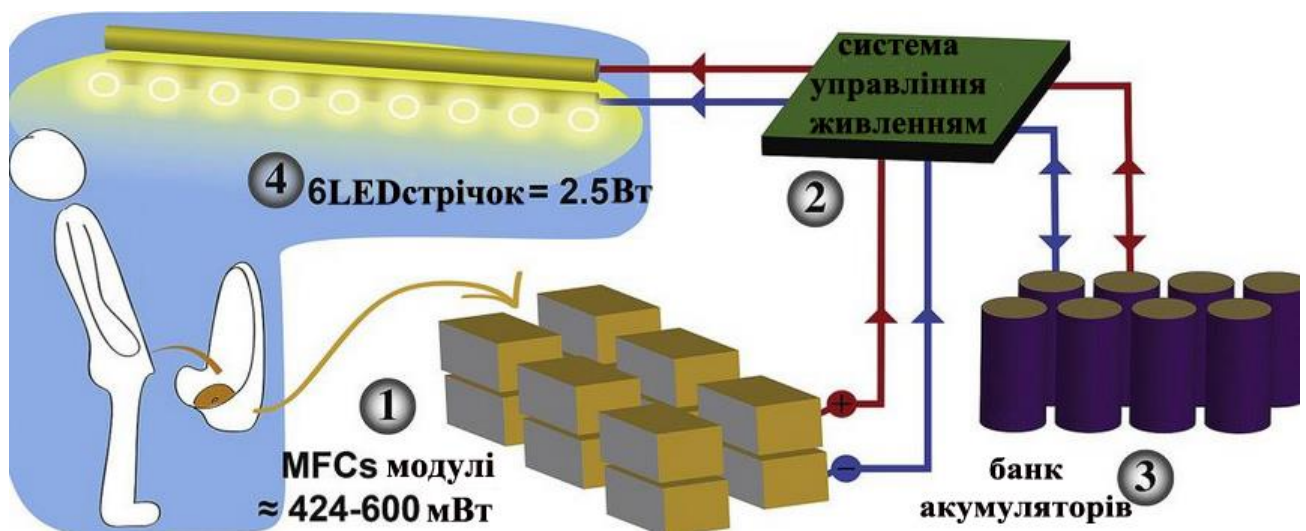


Рис..1.7.11 Схематичне зображення використання сечі для роботи мікробних паливних елементів Pee Power MFC. Генерована біоелектрика яких використовується для освітлення приміщення (Walter et al., 2018)

Перше зарядження мобільного телефону за допомогою електрики мікроорганізмів MFC було здійснено Ієропуолос в 2013 році, використовуючи кілька десят з'єднаних у модулі міні 6.5- мілілітрових керамічних MFC з вуглець

базованими електродами (Ieropoulos et al., 2013) (рис. 1.7.12). Для інокуляції використовували анаеробний мул та середовище, що складалося з ацетату як джерела вуглецю і дріжджового екстракту як джерела мінералів і мікроелементів, а в подальшому MFC працювали на сечі. Послідовним та паралельним з'єднанням MFC одиниць нарощували сумарну напругу. Отримана колективна напруга відкритого кола становила 7.2 В, що було достатнім для заряду 3.7 В 1500 мА h літій-іонного акумулятора мобільного телефону Samsung GT-E2121В. Зарядження телефону протягом 24 годин до 3.7 В, було достатнім для 25-хвилинної роботи телефону, протягом яких було отримано та надіслано кілька SMS-повідомлень, а також здійснено 6-хвилинний вихідний дзвінок (Ieropoulos et al., 2013).



Рис.1.7.12 Перша MFC система зарядження мобільного телефону мікробною біоелектрикою була громіздкою та складалася з двох блоків паралельно з'єднаних 12-послідовно з'єднаних керамічних MFC (Ieropoulos et al., 2013)

4 роки опісля, вдосконалену електробіотехнологію зарядження мобільного телефону представили науковці тієї ж Брістольської лабораторії робототехніки (Bristol Robotics Laboratory) Волтер та інш. (Walter et al., 2017). Вони продемонстрували можливість повної зарядки телефону до 4.2 В за 42-68 годин та повної зарядки сучасного смартфона за 68-82 годин, використовуючи сечу як

паливо MFC. Це перша система зарядки, що дозволяє 1 годину 45 хвилин дзвінків за 3 години заряду або 3 години активної експлуатації телефону в режимі дзвінків з наступною 6-годинною зарядкою, що потребує 600 мл сечі (рис. 1.7.13). Вся установка є більш компактною, складається з 6 модулів MFC, кожен MFC модуль має розмір 12x17x27см та містить 20 MFC з карбон-базованими електродами, загальна висота установки 77 см (Walter et al., 2017).

Отже, технологія MFC представляє новітню сучасну базу для розвитку різних її дочірніх відгалужень, в тому числі і для PMFC. Перевагою MFC на відміну від інших відновлювальних джерел енергії є круглодобове утворення біоелектрики, можливість прямого перетворення мікробної електрики в аналоговий сигнал, компактність, застосування на відходах, використання у віддалених важкодоступних місцях без потреби масштабного будівництва. Проблемою застосування мікробної біоелектрики залишається її низька потужність. Проте в останні десятиліття розроблено багато реальних концептів застосування MFC як для очищення відходів і одночасного отримання біоелектрики, так і для енергозабезпечення низькоенергоспоживаючих приладів: pomp, бездротових роботів-датчиків і метеосенсорів для моніторингу за навколишнім середовищем, заряду наручного годинника і світлодіодного освітлення, заряду мобільного телефону і смартфона. Технологія мікробних паливних елементів має велике майбутнє в новому енергоощадному вуглець нейтральному суспільстві.

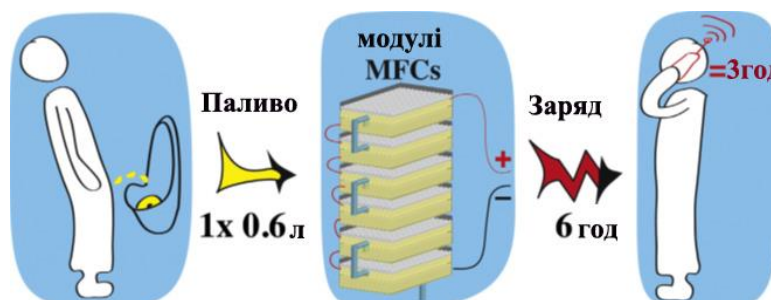


Рис. 1.7.13 Схематичне представлення суті мікробної електротехнології, що працює на сечі. 600 мл сечі є паливом для Pee Power MFC протягом 6 годин заряду, що дозволяє активну експлуатацію смартфона в режимі 3 годинних дзвінків (Walter et al., 2017).

Теоретичні розрахунки можливостей генерації біоелектрики електробіотехнологією рослинно-мікробних електро-біосистем, що відокремилась від технології MFC, показують, що технологія в перспективі за умови вдосконалення зможе служити для масштабних енергоємних потреб, таких як повне енергозабезпечення будинків невеликих сіл, цілих провінцій, зможе енергозабезпечувати станції заряджання електромобілів та електрокатерів і електровелосипедів, автономні електростанції дикого туризму в природних парках з можливістю підзарядки мобільних телефонів, акумуляторів фотоапаратів, ноутбуків. Застосування PMFC у великих масштабах є економічно доцільним у віддалених місцях, де спорудження ліній електропередач вимагає великих затрат і є трудоемким.

На сьогоднішньому етапі розвитку електро-біотехнологія рослинно-мікробної біоелектрики може виступати важливим доповненням до традиційних енергетичних систем (Strik et al., 2008), скорочуючи тим самим вуглець-позитивне і викидо-асоційоване енергоспоживання, живити сучасні прилади низького енергоспоживання такі як, вай-фай онлайн сенсори моніторингу за природними екосистемами чи світлодіодне освітлення, альтернативно самовідновлюючись, скорочувати енерговитрати традиційних джерел енергії. Розвиток сучасних технологій стимулює прогрес у розробці низькоенергоспоживаючих приладів, що є ресурсо ощадним підходом експлуатації природних ресурсів. Рослинно-мікробна електробіотехнологія, крім безпосередньої природоохоронної функції, яка властива кожному альтернативному джерелу енергії, також опосередковано виступає інструментарієм боротьби з глобальною зміною клімату та забрудненням середовища. Самим облаштуванням зелених дахів на будинках електробіотехнологія знижує енерговитрати на кондиціонування та опалення будинків. Створенням додаткових озоненених територій в містах для інсталяції електродних систем також покращує екологічний стан міського середовища. Електро-біосистеми на рисових полях та болотах знижують викиди важливого парникового газу метану. PMFC біотехнологія має також важливу опосередковану природоохоронну функцію будь-якої екосистеми, оскільки потенціал екосистеми

генерувати електрику надає їй ваги в очах широкого загалу та змушує суспільство оберігати її цілісність. Основні проблеми PMFC такі як робота при вихідній низькій напрузі, динамічність запасання енергії, динамічна швидкість зарядки та низьке енергопостачання потребують подальшої праці над їх вирішенням, розвитку і вдосконалення рослинно-мікробної електро-біотехнології для широкомасштабного застосування, так важливого для збереження середовища існування людини.

Висновки до розділу I

Визначення основних напрямків досліджень

Технологія отримання рослинно-мікробної біоелектрики є інноваційною галузю альтернативної енергетики, що стрімко розвивається з 2008 року. Рослинно-мікробна електробіотехнологія, що базується на екзоелектрогенній властивості мікроорганізмів віддавати електрони при окисненні рослинного ризодипозиту у вигляді корневих екскудатів та рослинного опаду в середовище та на електроди є екологічно чистою, позбавленою будь-яких загроз для довкілля, не потребує спеціальних територій та є легкою в експлуатації. Одночасно рослинно-мікробна електробіотехнологія виступає інструментом боротьби з наслідками і самим явищем глобальної зміни клімату та забруднення довкілля через зниження викидів парникових і токсичних газів, озеленення дахів будівель, очищення повітря, деградацію ґрунтових забруднень, участі в кліматорегуляції, рекреації і вирощуванні їжі.

Електродні матеріали біосистем є одними з визначальних факторів їх продуктивності. Вибір оптимальних матеріалів електродів підвищує продуктивність рослинно-мікробних біосистем. Найбільш широко використовуваними електродними матеріалами в рослинно-мікробній біоелектротехнології є вуглець базовані карбонові тканини. Графіт і нержавіюча сталь є хорошою та мало вивченою альтернативою традиційно використовуваним електродам в PMFC технології. Завдяки своїй

електропровідності та стійкості в зовнішньому середовищі, нержавіюча сталь має хороші перспективи як біоанод, проте висока вартість є його основним недоліком. Хімічна модифікація електродів через обробку кислотами чи приєднання металів, фізична 3D модифікація шляхом створення електродних сіток та губок є ефективними та водночас високовартісними стратегіями їх оптимізації. Тому питання бюджетної і ефективної пари електродів та низько вартісної і ефективної стратегії їх обробки для PMFC технології залишається відкритим. На теперішньому етапі розвитку мікробно-рослинної електробіотехнології пріоритетним завданням є дослідження нових дешевих і стабільних матеріалів для електродних систем та ефективних стратегій їх обробки, як і вивчення оптимальної глибини розташування електродів у субстраті, їх розміру та конфігурації, що в значній мірі впливає на вихідну потужність біосистем.

Визначальними біологічними факторами, які детермінують рівень генерації біоелектрики під час моделювання PMFC є вид рослини, тип спільноти мікроорганізмів та інших ґрунтових організмів, які тісно взаємопов'язані із складом середовища. Спектр рослин, вивчених для рослинно-мікробної електробіотехнології є досить вузьким та в своїй більшості включає окремі болотисті рослини; не дослідженими в плані придатності для біотехнології залишаються більшість як болотистих рослин, так і рослини неболотистих місцезростань європейського регіону, а також, декоративні та сільсько-господарські культури. Недостатньо вивченою залишається роль сульфатредуючих бактерій у електрогенезі. Поза увагою науковців залишаються числені представлені в ґрунтах анеліди, які можуть мати важливий вплив на отримання біоелектрики. Малодослідженими залишається функціонування електро-біосистем у природних незаболочених ґрунтових середовищах. Для оптимізації і стабільного функціонування рослинно-мікробних біосистем велике значення мають зовнішні фактори, що впливають на розвиток рослин та мікроорганізмів електробіотехнології: температура, вологість середовища та освітлення, фаза розвитку рослини, що залишаються малодослідженими, як в умовах будинків, так і *in situ*.

Протягом останнього десятиріччя з'являються перші практичні приклади застосування біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики та з'ясовано потенціал деяких заболочених територій: рисових полів, заболочених лісів Південної Кароліни, США та перші дослідження зелених дахів в Нідерландах та Південній Америці для продукції біоелектрики. Проте залишається недослідженим потенціал та перспективи електропродуктивності екосистем лісів, агроекосистем, урбоекосистем парків і лісопарків, техногенних забруднених територій, зелених дахів, терас та балконів будинків у східно-європейських кліматичних умовах, як і самих будинків в контексті екосмарт міст та сіл.

Реальне широкомасштабне застосування електробіотехнології рослинно-мікробної біоелектрики для енергоємних потреб лімітує потреба вирішення кількох проблем, таких як недостатня енергоефективність, коштовність та сезонні втрати біоелектрики, над якими працюють біоелектротехнологи всього світу. Пошук та випробування нових бюджетних і продуктивних електродних матеріалів, розробка ефективних схем і їх конфігурацій, вивчення ролі нових рослин серед гігрофітів, ксерофітів та мохів в природних середовищах, значення нітроген фіксуючих сульфатредуючих бактерій і анеллід у функціонуванні електро-біосистем, вплив зовнішніх факторів на ефективність генерації біоелектрики, що є основними інструментаріями вдосконалення електробіотехнології, а також, вивчення перспектив їх застосування в екосистемах у кліматичних умовах східно-європейського регіону та всередині будинків, були обрані завданнями дисертаційної роботи.

Матеріали розділу представлені в наступній публікації:

Rusyn I.B. Role of microbial community and plant species in performance of plant microbial fuel cells (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111697 (19p). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111697> **Scopus Q1 (=3) та міжнародний журнал, United Kingdom, Elsevier Ltd**

Apollon, W., **Rusyn, I.**, González-Gamboa, N., Kuleshova, T., Luna-Maldonado, A. I., Vidales-Contreras, J. A., Kamaraj, S.-K. (2022). Improvement of zero waste sustainable recovery using microbial energy generation systems: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 153055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153055> **Scopus Q1 (=3) та міжнародний журнал, Netherlands, Elsevier Ltd**

Література до розділу 1

- Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H. T., Boon, N., & Verstraete, W. (2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 40(10), 3388–3394. doi: 10.1021/es0525511
- Ahn, J. H., Jeong, W. S., Choi, M.Y., Kim, B. Y., Song, J., & Weon, H. Y. (2014). Phylogenetic diversity of dominant bacterial and archaeal communities in plant-microbial fuel cells using rice plants. *Journal of Microbiology & Biotechnology*, 24(12), 1707–1718. doi: 10.4014/jmb.1408.08053
- Alexandri, E., & Jones, P. (2006). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building & Environment*, 48(4), 480–493. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.10.055
- Arends, J. B., Speeckaert, J., Blondeel, E., De Vrieze, J., Boeckx, P., Verstraete, W., Rabaey, K., & Boon, N. (2014). Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 3205–3217. doi: 10.1007/s00253-013-5328-5
- Ashraf, M. H. P. J. C., & Harris, P. J. C. (2013). Photosynthesis understressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163–190. doi: 10.1007/s11099-013-0021-6
- Ayala-Ruiz, D., Atoche, A. C., Ruiz-Ibarra E., de la Rosa E. O., & Castillo J. V. (2019). A Self-Powered PMFC-Based Wireless Sensor Node for Smart City Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8986302, 10. doi: 10.1155/2019/8986302
- Azri, Y. M., Tou, I., Sadi, M. & Benhabyles, L. (2018). Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*, 15(4), 254–263. doi: 10.1080/15435075.2018.1432487

- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, J. G., Gilroy, S., & Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 233–266. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159
- Badri, D. V., Weir, T. L., van der Lelie, D., & Vivanco, J. M. (2009). Rhizosphere chemical dialogues: plant-microbe interactions. Review. *Current Opinion in Biotechnology*, 20 (6), 642-650. doi: 10.1016/j.copbio.2009.09.014.
- Bennetto, H. P. (1984). Life Chemistry Reports. Harwood Academic, London.
- Bennetto, H. P., Delaney, G. M., Mason, J. R., Roller, S. D., Stirling, J. L., & Thurston, C. F. (1984). Alternative Energy Sources VII, 4, Bioconversion/Hydrogen. Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Bennetto, H. P. (1990). Electricity generation by microorganisms. *Biotechnology Education 1*(4), 163–168. doi: 10.12691/wjce-7-2-17
- Berardi, U., Ghaffarian Hoseini, A. H., & Ghaffarian Hoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115 (C), 411–428. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.047
- Berg, G., & Smalla, K. (2009). Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere. *FEMS Microbiology Ecology*, 68 (1), 1–13. doi: 10.1111/j.1574-6941.2009.00654.x
- Bergel, A., Feron, D., & Mollica, A. (2005). Catalysis of oxygen reduction in PEM fuel cell by seawater biofilm. *Electrochemistry Communications*, 7(9), 900–904. doi: 10.1016/j.elecom.2005.06.006
- Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review: *Ecological Engineering*, 36(4), 351–360. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014
- Black, A., Hsu, P.-C. L., Hamonts, K. E., Clough, T. J., & Condon, L. M. (2016). Influence of copper on expression of nirS, norB and nosZ and the transcription and activity of NIR, NOR and N₂ OR in the denitrifying soil bacteria *Pseudomonas stutzeri*. *Microbial Biotechnology*, 9 (3), 381–388. doi: 10.1111/1751-7915.12352

- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: Designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats*, 4 (1), 27–36.
- Bombelli, P., Iyer, D. M. R., Covshoff, S., McCormick, A. J., Yunus, K., Hibberd, J. M., Fisher, A. C., & Howe, C. J. (2013). Comparison of power output by rice (*Oryza sativa*) and an associated weed (*Echinochloa glabrescens*) in vascular plant bio-photovoltaic (VP-BPV) systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97 (1), 429–438. doi: 10.1007/s00253-012-4473-6
- Bombelli, P., Dennis, R. J., Felder, F., Cooper, M. B., Iyer, D. M. R., Royles, J., Harrison, S. T, Smith, A. G, Harrison, C. J., & Howe, C. J. (2016). Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society Open Science*, 3(10), 160249. doi: 10.1098/rsos.160249
- Bond, D. R., Holmes, D. E., Tender, L. M., & Lovley, D. R. (2002). Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. *Science*, 295, 483–485. doi: 10.1126/science.1066771
- Bond, D. R., & Lovley, D. R. (2003). Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(3),1548–1555. doi: 10.1128/ AEM.69.3.1548-1555.2003
- Borker, M., Suchithra, T.V., Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2017) Sustainable Bioelectricity Generation from Living Plants. In: Patra, J., Vishnuprasad, C., Das, G. (eds). *Microbial Biotechnology*. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-6847-8_17
- Borole, A. P., O’Neill, H., Tsouris, C., & Cesar, S. (2008). A microbial fuel cell operating at low pH using the acidophile *Acidiphilium cryptum*. *Biotechnology Letters*, 30, 1367–1372. doi: 10.1007/s10529-008-9700-y
- Brunelli, D., Tosato, P., & Rossi, M. (2016). Flora health wireless monitoring with plant-microbial fuel cell. *Procedia Engineering*, 168, 1646–1650. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.481

- Brunelli, D., Rossi, M., & Tosato, P. (2017). A Radio-Triggered Wireless Sensor Platform Powered by Soil Bacteria. *Proceedings*, 1(568), 1–4. doi: 10.3390/proceedings1040568
- Cabezas, R. A. (2011). Diversity and Function of the Microbial Community on Anodes of Sediment Microbial Fuel Cells fueled by Root Exudates. PhD thesis, University of Marburg, Marburg (Germany).
- Cabezas, A., Pommerenke, B., Boon, N., & Friedrich, M. W. (2015). A *naeromyxobacter* and *A naerolineae* populations are enriched on anodes of root exudate--driven microbial fuel cells in rice field soil. *Environmental Microbiology Reports*, 7(3), 489–497. doi: 10.1111/1758-2229.12277
- Canarini, A., Kaiser, C., Merchant, A., Richter, A., & Wanek, W. (2019). Root Exudation of Primary Metabolites: Mechanisms and Their Roles in Plant Responses to Environmental Stimuli. *Frontier in Plant Science*, 10, 157. doi: 10.3389/fpls.2019.00157
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42, 1582–1591. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004
- Castro, L., Vera, M., Munoz, J. A., Blázquez, M. L., Gonzalez, F., Sand, W., & Ballester, A. (2013). Conductive filaments produced by *Aeromonas hydrophila*. *Advanced Materials Research*, 825, 210–213. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.825.210
- Cervantes-Alcala, R., Arrocha-Arcos, A. A., Peralta-Pelaez, L. A., & Ortega-Clemente, L. A. (2012). Electricity generation in sediment plant microbial fuel cells (SPMFC) in warm climates using *Typha domingensis* Pers. *International Research Journal of Biotechnology*, 3(9), 166–173.
- Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y., & Kim, I. S. (2009). Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 100(14), 3518–3525. doi: 10.1016/j.biortech.2009.02.065

- Chaudhuri, S. K., & Lovley, D. R. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, *21*, 1229–1232. doi: 10.1038/nbt867
- Chen, G. W., Choi, S. J. , Lee, T. H., Lee, G. Y., Cha, J. H., & Kim, C. W. (2008). Application of Biocathode in Microbial Fuel Cells: Cell Performance and Microbial Community. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *79*(3), 379–388. doi: 10.1007/s00253-008-1451-0
- Chen, Z., Huang, Y-C., Liang, J-H., Zhao, F., & Zhu, Y-G. (2011). A novel sediment microbial fuel cell with a biocathode in the rice rhizosphere. *Bioresource Technology*, *108*, 55-59. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.040
- Chen, S., Liu, Q., He, G., Zhou, Y., Hanif, M., Peng, X., Wang S., & Hou, H. (2012). Reticulated Carbon Foam Derived from a Sponge-Like Natural Product as a High Performance Anode in Microbial Fuel Cells. *Journal of Materials Chemistry*, *22*, 18609–18613. doi: 10.1039/C2JM33733A
- Chen, S., Rotaru, A.-E., Liu, F., Philips, J., Woodard, T. L., Nevin, K. P., & Lovley, D. R. (2014). Carbon cloth stimulates direct interspecies electron transfer in syntrophic cocultures. *Bioresource Technology*, *173*, 82–86. doi: 10.1016/j.biortech.2014.09.009
- Chen, S., Patil, S. A., Brown, R. K., & Schröder, U. (2019). Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: Transitioning from fundamental studies to practical implementation. *Applied Energy*, *233–234*, 15–28. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.015
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, *40*, 2426–2432. doi: 10.1021/es051652w
- Cheng, S., & Logan, B. E. (2007). Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*, *9*(3), 492–496. doi: 10.1016/j.elecom.2006.10.023

- Cheng, T. H., Ching, K. B., Uttraphan, C., & Heong, Y. M. (2020). Electrical energy production from plant biomass: an analysis model development for pandanus amaryllifolius plant microbial fuel cell. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(3), 1163–1171. doi: 10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1163-1171
- Chiranjeevi, P., Mohanakrishna, G., & Mohan, S.V. (2012). Rhizosphere mediated electrogenesis with the function of anode placement for harnessing bioenergy through CO₂ sequestration. *Bioresour Technol*, 124, 364–370. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.020
- Chow, A.T. (2006). Disinfection by product reactivity of aquatic humic substances derived from soils. *Water Research*, 40, 1426–1430. doi: 10.1016/j.watres.2006.01.008
- Chow, A. T., Dai, J., Conner, W. H., Hitchcock, D. R., & Wang, J.-J. (2013). Dissolved organic matter and nutrient dynamics of a coastal freshwater forested wetland in Winyah Bay, South Carolina. *Biogeochemistry*, 112, 571–587. doi: 10.1007/s10533-012-9750-z
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., & Heimann, M. (2014). Carbon and other biogeochemical cycles, 465–570. In: *Climate change 2013: the physical science basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Clauwaert, P., Rabaey, K., Aelterman, P., De Schamphelaire, L., Pham, T.H., Boeckx, P., Boon, N., & Verstraete, W. (2007). Biological denitrification in microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 41, 3354–3360. doi: 10.1021/es062580r
- Cohen, B. (1931). Thirty-second Annual Meeting of the Society of American Bacteriologists. *Journal of Bacteriology*, 21, 1–60.
- Corbella, C., Garfí, M., & Puigagut, J. (2014). Vertical redox profiles in treatment wetlands as function of hydraulic regime and macrophytes presence: surveying the

- optimal scenario for microbial fuel cell implementation. *Science of the Total Environment*, 470, 754–758. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.068
- Cornejo, J. A., Lopez, C., Babanova, S., Santoro, C., Artyushkova K., Ista, L., Schuler, A. J., & Atanassov, P. (2015). Surface Modification for Enhanced Biofilm Formation and Electron Transport in *Shewanella* Anodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 162, H597–H603. doi: 10.1149/2.0271509jes
- Conner, W. H., & Doyle, T.W., Krauss, K.W. (2007). Ecology of Tidal Freshwater Forested Wetlands of the Southeastern United States. Springer, New York.
- Cordas, C. M., Guerra, L. T., Xavier, C. & Moura, J. J. G. (2008). Electroactive biofilms of sulphate reducing bacteria. *Electrochimica Acta*, 54, 29–34. doi: 10.1016/j.electacta.2008.02.041
- Crittenden, S. R., Sund, C. J., & Sumner, J. J. (2006). Mediating Electron Transfer from Bacteria to a Gold Electrode via a Self-Assembled Monolayer. *Langmuir*, 22(23), 9473–9476. doi: 10.1021/la061869j
- Crow, P. (2005). The influence of soils and species on tree root depth. Forestry Commission, Edinburgh.
- Dai, J., Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- Dakora, F. D., & Phillips, D. A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant & Soil*, 245, 35–47. doi: 10.1023/A:1020809400075
- Davidson, N .C., & Finlayson, C. M. (2019). Updating global coastal wetland areas presented in Davidson and Finlayson (2018). *Marine and Freshwater Research*, 70, 1195–1200. doi: 10.1071/MF19010
- Davis, J. B., & Yarbrough, H. F. (1962). Preliminary experiments on a microbial fuel cell. *Science*, 137, 615–616.
- de la Rosa, E. O. , Castillo, J. V., Campos, M. C., Pool, G. R. B., Nunez, G. B., Atoche, A. C., & Ortegon, J. (2019). Aguilar Plant Microbial Fuel Cells – Based Energy

- Harvester System for Self-powered IoT Applications. *Sensors*, 19(1378), 1–16. doi: 10.3390/s19061378
- De Schamphelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- de Schamphelaire, L., Cabezas, A., Marzorati, M., Friedrich, M. W., Boon, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial community analysis of anodes from sediment microbial fuel cells powered by rhizodeposits of living rice plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 76, 2002–2008. doi: 10.1128/AEM.02432-09
- Debabov, V. G. (2008). Electricity from microorganisms. *Microbiology*, 77, 123–131. doi: 10.1134/S002626170802001X
- Delaney, G. M., Bennetto, H. P., Mason, J. R., Roller, S. D., Stirling, J. L., & Thurston, C. F. (1984). Electron-transfercoupling in microbial fuel cells. 2. Performance of fuel cells containing selected microorganism-mediator-substrate combinations. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 34, 13–27. doi:10.1002/jctb.280340104
- Dennis, P. G., Miller, A. J., & Hirsch, P. R. (2010). Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities?, *FEMS Microbiology Ecology*, 72(3), 313-327. doi: 10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x
- Deng, H., Chen Z., & Zhao F. (2012). Energy from Plants and Microorganisms: Progress in Plant–Microbial Fuel Cells. *ChemSusChem*, 5, 1006–1011. doi: 10.1002/cssc.201100257
- Deng, H., Wu, Y.-C., Zhang, F., Huang, Z.-C., Chen, Z., Xu, H.-J., and Zhao, F. (2014). Factors affecting the performance of single-chamber soil microbial fuel cells for power generation. *Pedosphere*, 24(3), 330–338. doi: 10.1016/S1002-0160(14)60019-9
- Deng, H., Cai, L., Jiang, Y., & Zhong, W. (2016). Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy [bian ji, Zhongguo ke xue yuan

- huan jing ke xue wei yuan hui" Huan jing ke xue" bian ji wei yuan hui]. *Huan Jing Ke Xue*, 37 (1), 359-365 (In chinese). doi: 10.13227/j.hjcx.2016.01.046
- Desvaux, M. (2005). *Clostridium cellulolyticum*: model organism of mesophilic cellulolytic clostridia. *FEMS Microbiology Reviews*, 29(4), 741-764. doi:10.1016/j.femsre.2004.11.003
- Dimitrijevic D., Zivcovic, P., Brancovic, J., Dobrnjac, M., & Stefanovic, Z. (2018). Air pollution removal and control by green living roof systems. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 11, 47–50.
- Dixon, M. J. R., Loh, J., Davidson, N .C., Beltrame, C., Freeman, R., & Walpole, M. (2016). Tracking global change in ecosystem area: The Wetland Extent Trends index. *Biological Conservation*, 193, 27–35. doi: 10.1016/j.biocon.2015.10.0239
- Dong, Y., Qu, Y., He, W., Du, Y., Liu, J., Han, X., & Feng, Y. (2015). A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode. *Bioresourse Technology*, 195, 66–72. doi: 10.1016/j.biortech.2015.06.026
- Donovan, C., Dewan, A., Peng, H., Heo, D., & Beyenal, H. (2011). Power management system for a 2.5 W remote sensor powered by a sediment microbial fuel cell. *Journal Power Sources*, 196, 1171–1177. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.08.099
- Donovan, C., Dewan, A., Heo, D., Lewandowski, Z., & Beyenal, H. (2013). Sediment microbial fuel cell powering a submersible ultrasonic receiver: New approach to remote monitoring. *Journal of Power Sources*, 233, 79–85. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.112
- Dumas, C., Basseguy, R., & Bergel, A. (2008). Electrochemical activity of *Geobacter sulfurreducens* biofilms on stainless steel anodes. *Electrochimica Acta*, 53 (16), 5235–5241. doi: 10.1016/j.electacta.2008.02.056
- El-Naggar, M. Y., Wanger, G., Leung, K. M., Yuzvinsky, T. D., Southam, G., Yang, J., Lau, W. M., Nealson, K. H., & Gorby, Y. (2010). Electrical transport along bacterial nanowires from *Shewanella oneidensis* MR-1. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 18127–18131. doi: 10.1073/pnas.1004880107

- Eaktasang, N., Kang, C. S., Lim, H., Kwean, O. S., Cho, S., Kim, Y., & Kim, H. S. (2016). Production of electrically-conductive nanoscale filaments by sulfate-reducing bacteria in the microbial fuel cell. *Bioresour Technol*, *201*, 61–67. doi: 10.1016/j.biortech.2015.12.090
- Earhart, C. F. (2009). Iron Metabolism. In: *Encyclopedia of Microbiology* (Third Edition), Academic press, 210-218. doi: 10.1016/B978-012373944-5.00076-6
- Ericsson, A. C., Davis, D. J., Franklin, & C. L., Hagan, C. E. (2015). Exoelectrogenic capacity of host microbiota predicts lymphocyte recruitment to the gut. *Physiological Genomics*, *47*, 243–252. doi: 10.1152/physiolgenomics.00010.2015
- Eshel, A., & Beeckman, T. (2013). *Plant Roots: The Hidden Half*. Fourth Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- European Parliament (2019). Available at: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20191121IPR67110/the-european-parliament-declares-climate-emergency> (accessed 29 November 2019).
- Ewing, T., Babauta, J. T., Atci, E., Tang, N., Orellana, J., Heo, D., & Beyenal, H. (2014). Self-powered wastewater treatment for the enhanced operation of a facultative lagoon. *Journal Power Sources*, *269*, 284–292. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.06.114
- Fang, Z., Song, H.-L., Cang, N., & Li, X.-N. (2013). Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresour Technol*, *144*, 165–171. doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.073
- Feng, Y., He, W., Liu, J., Wang, X., Qu, Y., & Ren, N. (2014). A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Bioresour Technol*, *156*, 132–138. doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.104
- FLORON (2014). Verspreidingsatlas planten. In: <http://www.verspreidingsatlas.nl/planten>
- Flimban S. G. A., Taeyoung K., Iqbal, M.I. I., & Oh S.-E. (2018). Overview of Microbial Fuel Cell (MFC) Recent Advancement from Fundamentals to

- Applications: MFC Designs, Major Elements, and Scalability. *Preprints*, 2018100763. doi:10.20944/preprints201810.0763.v1
- Frey, S. D., Knorr M., Parrent J. L., & Simpson, R. T. (2004). Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Forest Ecology & Management*, 196, 159–171. doi: 10.1016/j.foreco.2004.03.018
- Gajda, I., Greenman, J., Melhuish, C., & Ieropoulos, I. (2015). Simultaneous electricity generation and microbially-assisted electrosynthesis in ceramic MFCs. *Bioelectrochemistry*, 104, 58–64. doi: 10.1016/j.bioelechem.2015.03.001
- Ge, Z., Wu, L., Zhang, F., & He, Z. (2015). Energy extraction from a large-scale microbial fuel cell system treating municipal wastewater. *Journal Power Sources* 297, 260–264. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.07.105
- Gil, G.-C., Chang, I.-S., Kim, B. H., Kim, M., Jang, J. K., Park, H. S., & Kim H. J. (2003). Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 18, 327–334. doi: 10.1016/S0956-5663(02)00110-0
- Gilani, S. R., Yaseen, A., Zaidi, S. R. A., Zahra, M., and Mahmood, Z. (2016). Photocurrent generation through plant microbial fuel cell by varying electrode materials. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 38 (1), 17–27.
- Gregory, K. B., Bond, D. R. & Lovley, D. R. (2004). Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environmental Microbiology*, 6, 596–604. doi: 10.1111/j.1462-2920.2004.00593.x.
- Gomora-Hernandez, J. C., Serment-Guerrero, J. H., Carreno-de-Leon, M. C., & Flores-Alamo, N. (2020). Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19 (1), 227–237. doi: 10.24275/rmiq/IA542
- Gorby, Y. A., Yanina, S., McLean, J. S., Rosso, K. M., Moyles, D., Dohnalkova, A., Beveridge, T. J., Chang, I. S., Kim, B. H., Kim, K. S., Culley, D. E., Reed, S. B., Romine, M. F., Saffarini, D. A., Hill, E. A., Shi, L., Elias, D. A., Kennedy, D. W., Pinchuk, G., Watanabe, K., Ishii, S., Logan, B., Nealson, K. H., & Fredrickson, J.

- K. (2006). Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, 103 (30), 11358–11363. doi: 10.1073/pnas.0604517103
- Grattieri, M., Hasan, K., & Minteer, S. (2017). ChemElectroChem Bioelectrochemical Systems as a Multipurpose Biosensing Tool: Present Perspective and Future Outlook. *Chemelectronchem. Special Issue: Electrochemical Biosensing*, 4 (4), 834–842. doi: 10.1002/celc.201600507
- Guadarrama- Pérez, O., Gutiérrez -Macías, T., García-Sánchez, L., Guadarrama-Pérez, V. H., & Estrada-Arriaga, E. B. (2019). Recent advances in constructed wetland-microbial fuel cells for simultaneous bioelectricity production and wastewater treatment: A review. *International Journal of Energy Research*, 43 (10), 5106–5127. doi:10.1002/er.4496
- Gupta, S. M., Agarwal, A., Dev, B., Kumar, K., Prakash, O., Arya, M. C., & Nasim, M. (2016). Assessment of photosynthetic potential of indoor plants under cold stress. *Photosynthetica*, 54 (1), 138–142. doi:10.1007/s11099-015-0173-7
- Gutierrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gandara, M. A. (2014). Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63, 166–176. doi: 10.1109/TIM.2013.2276487
- Guo, K., Freguia, S., Dennis, P. G., Chen, X., Donose, B. C., Keller, J., Gooding, J. J., & Rabaey, K. (2013). Effects of Surface Charge and Hydrophobicity on Anodic Biofilm Formation, Community Composition, and Current Generation in Bioelectrochemical Systems. *Environmental Science & Technology*, 47, 7563–7570. doi: 10.1021/es400901u
- Habermann, W., & Pommer, E. H. (1991). Biological Fuel Cells with Sulphide Storage Capacity. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 35, 128–133. doi: 10.1007/BF00180650
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., & Sheng, G. P. (2016). Bioelectrochemical chromium (VI) removal in plant-microbial fuel cells.

- Environmental Science & Technology*, 50, 3882–3889. doi: 10.1021/acs.est.5b06376
- Hallberg, K., Hedrich, S., & Johnson, D. B. (2011). *Acidiferrobacter thiooxydans*, gen. nov. sp. nov.; an acidophilic, thermotolerant, facultatively anaerobic iron- and sulfur-oxidizer of the family Ectothiorhodospiraceae. *Extremophiles*, 15 (2), 271–279. doi: 10.1007/s00792-011-0359-2
- Hamelers, H. V. M., Ter Heijne, A., Sleutels, T. H. J. A., Jeremiassen, A. W., Strik, D. P. B. T. B., & Buisman, C. J. N. (2010). New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(6), 1673–1685. doi: 10.1007/s00253-009-2357-1
- Harnisch, F., Schroder, U., & Scholz, F. (2008). The suitability of monopolar and bipolar ion exchange membranes as separators for biological fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 42, 1740–1746. doi: 10.1021/es702224a
- Harnisch, F., Wirth, S., & Schroder, U. (2009). Effects of substrate and metabolite crossover on the cathodic oxygen reduction reaction in microbial fuel cells: platinum vs. iron(II) phthalocyanine based electrodes. *Electrochemistry Communications*, 11, 2253–2256. doi:10.1016/j.elecom.2009.10.002
- Hasletta, N., Rawson, F., Barrierec, F., Kunzed, G., Pascoe, N., Gooneratne, R., & Baronian, K. (2011). Characterisation of yeast microbial fuel cell with the yeast *Arxula adenivorans* as the biocatalyst. *Biosensors & Bioelectronics*, 26, 3742–3747. doi: 10.1016/j.bios.2011.02.011
- He, Z., & Angenent, L. T. (2006). Application of Bacterial Biocathodes in Microbial Fuel Cells. *Electroanalysis*, 18, 2009–2015. doi: 10.1002/elan.200603628
- Heijne, A., Hamelers, H. V. M., Saakes, M., & Buisman, C. J. N. (2008). Performance of non-porous graphite and titanium-based anodes in microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 53, 5697–5703. doi:10.1016/j.electacta.2008.03.032
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and

- Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2011). New plantgrowth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 104, 417–423. doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.005
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, 5, 70. doi: 10.1186/1754-6834-5-70
- Helder, M. (2013). Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell. Electricity generation with living plants – from lab to application. Dissertation. Wageningen University, Netherland.
- Helder, M., Chen, W. S., Van Der Harst, E. J. M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Buisman, C. J. N., & Potting, J. (2013a). Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 7, 52–64. doi: 10.1002/bbb.1373
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T, Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013b). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51, 1–7. doi: 10.1016/j.biombioe.2012.10.011
- Hidalgo, D., Tommasi, T., Bocchini, S., Chiolerio, A., Chiodoni, A., Mazzarino, I. & Ruggeri, B. (2016). Surface Modification of Commercial Carbon Felt Used as Anode for Microbial Fuel Cells. *Energy*, 99, 193–201. doi: 10.1016/j.energy.2016.01.039
- Hirano, S. L., Kitauchi, F., Haruki, M., Imanaka, T., Morikava, M., & Kanaya, S. (2004). Isolation and Characterization of *Xantobacter polyaromaticivorans* sp. nov.127 W That Degrades Polycyclic and Heterocyclic Aromatic Compounds under Extremely Low Oxygen Conditions. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, 68, 557–564. doi: 10.1271/bbb.68.557

- Holmer, M., Gribsholt, B., & Kristensen, E. (2002). Effects of sea level rise on growth of *Spartina anglica* and oxygen dynamics in rhizosphere and salt marsh sediments. *Marine Ecology Progress Series*, 225, 197–204. doi: 10.3354/meps225197
- Holmes, D. E., Bond, D. R. & Lovley, D. R. (2004a). Electron transfer by *Desulfobulbus propionicus* to Fe(III) and graphite electrodes. *Applied & Environmental Microbiology*, 70, 1234–1237. doi: 10.1128/AEM.70.2.1234-1237.2004
- Holmes, D. E., Bond, D. R., O’Neil, R. A., Reimers, C. E., Tender, L. R., & Lovley, D. R. (2004b). Microbial communities associated with electrodes harvesting electricity from a variety of aquatic sediments. *Microbial Ecology*, 48, 178–190. doi: 10.1007/s00248-003-0004-4
- Hong, S. W., Chang, I. S., Choi, Y. S., & Chung, T. H. (2009). Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 100, 3029–3035. doi: 10.1016/j.biortech.2009.01.030
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L., & Zhang, H. (2017). Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 586, 319–327. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2010). Potential application of *Candida melibiosica* in biofuel cells. *Bioelectrochemistry*, 78, 57–61. doi: 10.1016/j.bioelechem.2009.07.005
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2011). Bacterial mutualism in the mosses roots applicable in Bryophyta-microbial fuel cell. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 76, 63–65.
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2012). Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 87, 185–191. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2015). Extracellular electron transfer in yeast-based biofuel cells: a review. *Bioelectrochemistry*, 106, 177–185. doi:10.1016/j.bioelechem.2015.04.001

- Huircan, J. I., Munoz, C., Young, H., Dossow, L. V., Bustos, J., Vivallo, G., & Toneatti, M. (2010). Zig Bee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, *74*, 258–264. doi: 10.1016/j.compag.2010.08.014
- Ieropoulos, I., Melhuish, C. & Greenman, J. (2003). Artificial Metabolism: Towards True Energetic Autonomy in Artificial Life, 792–799. In: Proceedings of Advances in Artificial Life, 7th European Conference in Artificial Life (ECAL), September 2003. Berlin Heidelberg, Germany, Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-540-39432-7_85
- Ieropoulos, I., Melhuish, C., Greenman, J., & Horsfield, I. (2005). EcoBot-II: An artificial agent with a natural metabolism. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *2* (4), 295–300. doi: 10.5772/5777
- Ieropoulos, I., Greenman, J., Melhuish, C., & Horsfield, I. (2010a). EcoBot-III – A Robot with Guts, 733–740. In: Proceeding of the Artificial Life XII Conference, Odense, Denmark, 2010.
- Ieropoulos, I. A., Winfield, J., Greenman, J., & Melhuish, C. (2010b). Small Scale Microbial Fuel Cells and Different Ways of Reporting Output. *ECS Transactions*, *28* (9), 1–9. doi: 10.1149/1.3492221
- Ieropoulos, I. A., Ledezma, P., Stinchcombe, A., Papaharalabos, G., Melhuish, C., & Greenman, J. (2013). Waste to real energy: the first MFC powered mobile phone. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *15*, 15312–15316. doi: 10.1039/C3CP52889H
- Ieropoulos, I. A., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., Sanchez-Herranz, D., & Greenman, J. (2016). Pee power urinal – microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation. *Environmental Science: Water Research Technology*, *2*, 336–343. doi: 10.1039/C5EW00270B
- Ishikawa, S-I., & Kachi, N. (2000). Differential salt tolerance of two *Artemisia* species growing in contrasting coastal habitats. *Ecological Research*, *15*, 241–247.
- Ivanov, R., Bratkova, S., & Angelov, A. (2017). Analysis of the efficiency of microbial fuel cells based on sulfate-reduction process, integrated in anaerobic wetlands.

Annuaire de l'Université de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Biologie, 102 (4), 248-260.

- Jiang, D., Li, B., Jia, W., & Lei, Y. (2010). Effect of inoculum types on bacterial adhesion and power production in microbial fuel cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 160*, 182–196, doi: 10.1007/s12010-009-8541-z
- Jiang, D., Curtis, M., Troop, E., K. Scheible, K., McGrath, J., Hu, B., Suib, S., Raymond, D., & Li, B. (2011). A pilot-scale study on utilizing multi-anode/cathode microbial fuel cells (MAC MFCs) to enhance the power production in wastewater treatment. *International Journal of Hydrogen Energy, 36*, 876–884. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.074
- Jiang, Y-B, Zhong, W-Hi, Han, C., & Deng., H. (2016). Characterization of Electricity Generated by Soil in Microbial Fuel Cells and the Isolation of Soil Source Exoelectrogenic Bacteria. *Frontiers in Microbiology, 7*, 1776. doi: 10.3389/fmicb.2016.01776
- Jiang, Y., Yang, X., Liang, P., Liu, P., & Huang, X. (2018). Microbial fuel cell sensors for water quality early warning systems: Fundamentals, signal resolution, optimization and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81*, 292–305. doi: 10.1016/J.RSER.2017.06.099
- Jones, D. L. (1998) Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and soil, 205*, 25–44. doi: 10.1023/A:1004356007312
- Jung, S., & Regan, J. M. (2007). Comparison of anode bacterial communities and performance in microbial fuel cells with different electron donors. *Applied Microbiology and Biotechnology, 77*, 393–402. doi: 10.1007/s00253-007-1162-y
- Jung, S., Lee, J., Hyeon, T., Lee, M., & Kim, D. H. (2014). Fabric-Based Integrated Energy Devices for Wearable Activity Monitors. *Advanced Materials, 26*, 6329–6334. doi: 10.1002/adma.201402439
- Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K. & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 110* (C), 402-414. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.016

- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *79*(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Kalathil, S., Lee, J., & Cho, M. H. (2011). Granular Activated Carbon Based Microbial Fuel Cell for Simultaneous Decolorization of Real Wastewater and Electricity Generation. *New Biotechnology*, *29*, 32–37. doi: 10.1016/j.nbt.2011.04.014
- Kalathil, S., Lee, J., & Cho, M. H. (2012). Efficient Decolorization of Real Dye Wastewater and Bioelectricity Generation Using a Novel Single Chamber Biocathode Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, *119*, 22–27. doi: 10.1016/j.biortech.2012.05.059
- Kalathil, S., Khan, M. M., Lee, J., & Cho, M. H. (2013). Production of Bioelectricity, Bio-Hydrogen, High Value Chemicals and Bioinspired Nanomaterials by Electrochemically Active Biofilms. *Biotechnology Advances*, *31*, 915–924. doi: 10.1016/j.biotechadv.2013.05.001
- Kalathil, S., & Pant, D. (2016). Nanotechnology to Rescue Bacterial Bidirectional Extracellular Electron Transfer in Bioelectrochemical Systems. *RSC Advances*, *6*, 30582–30597. doi: 10.1039/C6RA04734C
- Kalathil, S., Patil, S. A., & Pant, D. (2017). Microbial Fuel Cells: Electrode materials. In: Wandelt, K. & Vadgama, P. (Eds). *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface science and Electrochemistry*. Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-12-409547-2.13459-6
- Kan, J., Hsu, L., Cheung, A. C., Pirbazari, M., & Neelson, K. H. (2010). Current production by bacterial communities in microbial fuel cells enriched from wastewater sludge with different electron donors. *Environmental Science & Technology*, *45*, 1139–1146. doi: 10.1021/es102645v
- Kaneshiro, H., Takano, K., Takada, Y., Wakisaka, T., Tachibana, T., & Azuma, M. (2014). A milliliter-scale yeast-based fuel cell with high performance. *Biochemical Engineering Journal*, *83*, 90–96.
- Kato, S., Haruta, S., Cui, Z. J., Ishii, M., & Igarashi, Y. (2004). Effective cellulose degradation by a mixed-culture system composed of a cellulolytic *Clostridium* and

- aerobic non-cellulolytic bacteria. *FEMS Microbiology Ecology*, 51(1), 133-142. doi:10.1016/j.femsec.2004.07.015
- Kato, S, Hashimoto, K, & Wantanabe, K. (2012). Microbial interspecies electron transfer via electric currents through conductive minerals. *Proc Natl Acad Sci USA* 109: 10042–10046.
- Kato, S., Yumoto, I., & Kamagata, Y. (2015). Isolation of acetogenic bacteria that induce biocorrosion by utilizing metallic iron as the sole electron donor. *Applied and Environmental Microbiology*, 81, 67–73. doi: 10.1128/AEM.02767-14
- Karube, I., Matsunaga, T., Tsuru, S., & Suzuki, S. (1977). Biochemical fuel cell utilizing immobilized cells of *Clostridium butyricum*. *Biotechnology and Bioengineering*, 19 (11), 1727–1733. doi: 10.1002/bit.260191112
- Ketep, S. F., Bergel, A., Calmet, A., & Erable, B. (2014). Stainless Steel Foam Increases the Current Produced by Microbial Bioanodes in Bioelectrochemical Systems. *Energy & Environmental Science*, 7, 1633–1637. doi: 10.1039/C3EE44114H
- Khudzari, J. M. (2018). Bioelectricity production in compost, soil, and PlantMicrobial Fuel Cells. Dissertation. Sainte-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada.
- Khudzari, J. M., Kurian, J, Gariepy, Y., Tartakovsky, B., & Vijaya Raghavan, G. S. (2018). Effects of salinity, growing media, and photoperiod on bioelectricity production in plant microbial fuel cells with weeping alkaligrass. *Biomass & Bioenergy*, 109, 1–9. doi: org/10.1016/j.biombioe.2017.12.013
- Kim, B. H., Kim, H. J., Hyun, M. S., & Park, D. H. (1999). Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium *Shewanella putrefaciens*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 9, 127–131.
- Kim, B.H., Park, H.S., Kim, H.J., Kim, G. T., Chang, I. S., J. Lee, & Phung, N. T. (2004). Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63, 672-681. doi: 10.1007/s00253-003-1412-6

- Kim, Y.-K., Lee, S.-C., Cho, Y.-Y., Oh, H.-J., & Ko, Y. H. (2012). Isolation of Cellulolytic *Bacillus subtilis* Strains from Agricultural Environments. *ISRN Microbiology*, 650563. doi: 10.5402/2012/650563
- Khaled, F., Ondel, O., & Allard, B. (2016). Microbial fuel cells as power supply of a low-power temperature sensor. *Journal Power Sources*, 306, 354–360. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.12.040
- Klaisongkram, N., & Holasut, K. (2015). Electricity Generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using *Cyperus involucratus* R. *KKU Engineering Journal*, 42(1), 117–124. doi: 10.14456/kkuenj.2015.2
- Konyuhov, V. Yu., Gladkih, A. M., Galyautdinov, I. I., & Kiseleva, T. Yu. (2019). Ecological architecture: the green roofs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 350, 012035. doi: 10.1088/1755-1315/350/1/012035
- Kouzuma, A., Kasai, T., Nakagawa, G., Yamamuro, A., Abe, T., & Watanabe, K. (2013). Comparative metagenomics of anode-associated microbiomes developed in rice paddy-field microbial fuel cells. *PLOS One*, 8(11), e77443. doi:10.1371/journal.pone.0077443
- Kouzuma, A., Kaku, N., & Watanabe, K. (2014). Microbial electricity generation in rice paddy fields: recent advances and perspectives in rhizosphere microbial fuel cells. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(23), 9521–9526. doi:10.1007/s00253-014-6138-0
- Kuzyakov, Y. (2002). Review: factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165, 382-396. doi: 10.1002/1522-2624(200208)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-%23
- Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000). Carbon input by plants into the soil, Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 163(4), 421-431. doi:10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R
- Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2009). Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied & Environmental Microbiology*, 75, 5111–5120. doi: 10.1128/AEM.00335-09

- Lehmann, S. (2014). Low carbon districts: mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. *City, Culture and Society*, 5, 1–8. doi: 10.1016/j.ccs.2014.02.002
- Lehner B., & Doll P. (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 296(1–4), 1–22. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.028
- Lewis, K. (1966). Symposium on bioelectrochemistry of microorganisms. 4. Biochemical fuel cells. *Bacteriology Reviews*, 30,101–113.
- Li, H., Liao, B., Xiong, J., Zhou, X., Zhi, H., Liu,X., Li,X., & Li,W. (2018). Power output of microbial fuel cell emphasizing interaction of anodic binder with bacteria. *Journal of Power Sources*, 379, 115–122. doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.040
- Li, Y., & Li, H. (2014). Type IV pili of *Acidithiobacillusferrooxidans* can transfer electrons from extracellular electron donors. *Journal of Basic Microbiology*, 54, 226–231. doi: 10.1002/jobm.201200300
- Liang, Y., Feng, H., Shen, D., Li, N., Guo, K. Zhou, Y., Xu, J., Chen, W., Jia, Y., & Huang, B. (2017). Enhancement of Anodic Biofilm Formation and Current Output in Microbial Fuel Cells by Composite Modifications of StainlessSteel Electrodes. *Journal of Power Sources*, 342, 98–104. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.020
- Light, S. H., Su, L., Rivera-Lugo, R., Cornejo, J. A., Louie, A., Iavarone, A. T., Ajo-Franklin, C. M., & Portnoy, D. A. (2018). A flavin-based extracellular electron transfer mechanism in diverse Gram-positive bacteria. *Nature*, 562, 140–144. doi: 10.1038/s41586-018-0498-z
- Liu, F, Rotaru, A-E, Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Nevin, K. P., & Lovley, D. R. (2012). Promoting direct interspecies electron transfer with activated carbon. *Energy Environmental Science*, 5, 8982–8989. doi: 10.1039/C2EE22459C
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, 172010, 1–10. doi:10.1155/2013/172010

- Liu, W., Cheng, S., & Guo, J. (2014). Anode Modification With Formic Acid: A Simple and Effective Method to Improve the Power Generation of Microbial Fuel Cells. *Applied Surface Science*, *320*, 281–286. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.09.088
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends Microbiology*, *14*, 512–518. doi: 10.1016/j.tim.2006.10.003
- Logan, B., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production in Air-Cathode Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, *41*, 3341–3346. doi: 10.1021/es062644y
- Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology* *7*, 375–381. doi: 10.1038/nrmicro2113
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A., & Saikaly, P. E. (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology*, *17*(5), 307–319. doi: 10.1038/s41579-019-0173-x
- Loster, M. (2006). Local solar irradiance averaged over three years from 1991 to 1993 (24 hours a day) taking into account the cloud coverage available from weather satellites. In: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_land_area.png
- Lovley, D. R. (2008). The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology*, *19*, 564–571. doi: 10.1016/j.copbio.2008.10.005
- Lovley, D. R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N. S., Shrestha, P. M., Flanagan, K. A., Akhujkar, M., Butler, J. E., Giloteaux, L., Rotaru, A. E., Holmes, D.E., Franks, A. E., Orellana, R., Risso, C., & Nevin, K.P. (2011). Geobacter: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *Advanced in Microbial Physiology*, *59*, 1–100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5
- Lovley, D. R. (2016). Happy together: microbial communities that hook up to swap electrons. *ISME Journal*, *11*, 327–336. doi: 10.1038/ismej.2016.136
- Lovley, D. R. (2017). Syntrophy goes electric: direct interspecies electron transfer. *Annual Review of Microbiology*, *71*, 643–664. doi: 10.1146/annurev-micro-030117-020420

- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *195*, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Lynch, J. M., & Whipps, J. M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, *129*(1), 1–10.
- Lynd, L. R., Weimer, P. J., Van Zyl, W. H., & Pretorius, I. S. (2002). Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology Molecular Biology Reviews*, *66*, 506–577. doi: 10.1128/membr.66.3.506-577.2002
- Lytvyn, V., Vysotska, V., Mykhailyshyn, V., Peleshchak, I., Peleshchak, R., & Kohut, I. (2019). Intelligent system of a smart house, 282-287. In: 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies. AICT.
- Lytvyn, V., Vysotska, V., Shakhovska, N., Mykhailyshyn, V., Medykovskyy, M., Peleshchak, I., Fernandes, V. B., Peleshchak, R., & Shcherbak, S. (2020). A Smart Home System Development, 804–830. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing IV*, Springer Nature Switzerland AG 2020, 1080. Springer, Cham.
- Madigan, M. T., & Jung, D. O. (2008). An Overview of Purple Bacteria: Systematics, Physiology, and Habitats. In book: Hunter, C. N., Daldal, F., Thurnauer, M. C., Beatty, J. T. (eds.) *The Purple Phototrophic Bacteria*, Springer, Dordrecht. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4020-8815-5_1
- Mauchamp, A., & Mesleard, F. (2001). Salt tolerance in *Phragmites australis* populations from coastal Mediterranean marshes. *Aquatic Botany*, *70*(1), 39–52. doi: 10.1016/S0304-3770(00)00140-6
- Malkin, S. Y., & Meysman, F. J. R. (2015). Rapid redox signal transmission by 'cable bacteria' beneath a photosynthetic biofilm. *Applied & Environmental Microbiology*, *81*, 948–956. doi: 10.1128/AEM.02682-14
- Martinucci, E., Pizza, F., Perrino, D., Colombo, A., Trasatti, S. P. M., Lazzarini Barnabei, A., Liberale, A., & Cristiani, P. (2015). Energy balance and microbial fuel cells experimentation at wastewater treatment plant Milano-Nosedo. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*, 14683–14689. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.08.100

- Meek, B. D., & Chesworth, W. (2008). Redox Reactions and Diagrams in Soil. Encyclopedia of Soil Science, Springer. doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_477
- Meikle, W. G., & Holst, N. (2015). Application of continuous monitoring of honeybee colonies. *Apidologie*, 46, 10–22. doi: 10.1007/s13592-014-0298-x
- Melhuish, C., Ieropoulos, I., Greenman, J., & Horsfield, I. (2006). Energetically autonomous robots: Food for thought. *Autonomous Robots*, 21(3), 187–198. doi:10.1007/s10514-006-6574-5
- Mentens, D. R. & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77, 217–226. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.010
- Min, B., & Logan, B.E. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 38, 5809–5814. doi: 10.1021/es0491026
- Min, B., Cheng S., & Logan, B. E. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research*, 39, 1675–1686. doi:1016/j.watres.2005.02.002
- Minchin, P. E. H., & McNaughton, G. S. (1984). Exudation of recently fixed carbon by non-sterile roots. *Journal of Experimental Botany*, 35, 74–82. doi:10.1093/jxb/35.1.74
- Moe, L. A. (2013). Amino acids in the rhizosphere: from plants to microbes. *American Journal of Botany*, 100 (9), 1692–1705. doi: 10.3732/ajb.1300033.
- Mohtasham, J. (2015). Review Article-Renewable Energies. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15. *Energy Procedia*, 74, 1289 –1297.
- Mokriienko, V. A., & Tsentylo, L. V. (2011). Osoblyvosti rostu i rozvytku kukurudzy zalezno vid strokiv sivby ta hustoty stoiannia roslyn. [Features of growth and development of corn, depending on the time of sowing and density of plants]. Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Elektronne naukove fakhove vydannia, 3 (25) (in Ukrainian).

- Moqsud, M. A., Yoshitake, J., Bushra, Q. S., Hyodo, M., Omine, K., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, *36*, 63–69. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.004
- Moqsud, A. M., Gazalia, T. A., Omineb, K., & Nakataa, Y. (2017). Green electricity by water plants in organic soil and marine sediment through microbial fuel cell. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *39* (2), 160–165. doi: 10.1080/15567036.2016.1159263
- Monzon, O., Yang, Y., Li, Q., & Alvarez, P. J. J. (2016). Quorum sensing autoinducers enhance biofilm formation and power production in a hypersaline microbial fuel cell. *Biochemical Engineering Journal*, *109*, 222–227. doi: 10.1016/j.bej.2016.01.023
- Morris, J. M., & Jin, S. (2009). Influence of NO₃ and SO₄ on power generation from microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, *153*, 127–130. doi: 10.1016/j.cej.2009.06.023
- Muyzer, G., & Stams, A. J. (2008). The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, *6*(6), 441–454. doi:10.1038/nrmicro1892.
- Myers, J. M., & Myers, C. R. (2000). Role of the tetraheme cytochrome CymA in anaerobic electron transport in cells of *Shewanella putrefaciens* MR-1 with normal levels of menaquinone. *Journal of Bacteriology*, *182*, 67–75. doi: 10.1128/jb.182.1.67-75.2000
- Nevin, K. P., Woodard, T. L., Franks, A. E., Summers, A. M., & Lovley, D. R. (2010). Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. *mBio*, *1*, e00103-10. doi: 10.1128/mBio.00103-10
- Niessen, J., Schroder, U., & Scholz, F. (2004). Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation – a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochemistry Communications*, *6*, 955–958. doi:10.1016/j.elecom.2004.07.010

- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81–89. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.064
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Brass, B., Coffmann, R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience*, 57(10), 823–833. doi: 10.1641/B571005
- Oodally, A., Gulamhussein, M., & Randall, D. G. (2019). Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African wetland plants. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100930, 1–8. doi: org/10.1016/j.jwpe.2019.100930
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresour. Technol.*, 186, 270–275. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.014
- Pamintuan, K. R. S., Gonzales, A. J. S., Estefanio, B. M. M., & Bartolo, B. L. S. (2018a). Simultaneous phytoremediation of Ni²⁺ and bioelectricity generation in a plant-microbial fuel cell assembly using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). In: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 191, 012093, 1–5. The 4th International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2018), IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/191/1/012093
- Pamintuan, K. R. S., Clomera, J. A. A., Garcia, K. V., Ravara, G. R. & Salamat, E. J. G. (2018b). Stacking of aquatic plant-microbial fuel cells growing water spinach (*Ipomoea aquatica*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). In: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 191, 012054. The 4th International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2018), IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/191/1/012054
- Pandey, P., Shinde, V. N., Deopurkar, R. L., Kale, S. P., Patil, S. A., & Pant, D. (2016). Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward

- wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*, 168, 706–723. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.056
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1544. doi:10.1016/j.biortech.2009.10.017
- Papaharalabos, G., Greenman, J., Melhuish, C., Santoro, C., Cristiani, P., Li, B., & Ieropoulos, I. (2013). Increased power output from micro porous layer (MPL) cathode microbial fuel cells (MFC). *International Journal Hydrogen Energy*, 38, 11552–11558. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.138
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2000). Electricity Generation in Microbial Fuel Cells Using Neutral Red as an Electronophore. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(4), 1292–1297. doi: 10.1128/AEM.66.4.1292-1297.2000
- Park, D. H., & Kim, B. H. (2001). Growth properties of the iron-reducing bacteria, *Shewanella putrefaciens* IR-1 and MR-1 coupling to reduction of Fe(III) to Fe(II). *Journal of Microbiology*, 39, 273–278.
- Park, H. S., Kim, B. H., Kim, H. S., Kim, H. J., Kim, G. T., Kim, M., Chang, I. S., Park, Y. K., & Chang, H. I. (2001). A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from a microbial fuel cell. *Anaerobe*, 7, 297–306. doi: 10.1006/anae.2001.0399
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2002). Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59, 58–61. doi: 10.1007/s00253-002-0972-1
- Patil, S. A., Harnisch, F., Kapadnis, B., & Schroder, U. (2010). Electroactive mixed culture biofilms in microbial bioelectrochemical systems: The role of temperature for biofilm formation and performance. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(2), 803–808. doi:10.1016/j.bios.2010.06.019
- Pfeffer, C., Larsen, S., Song, J., Dong, M., Besenbacher, F., Meyer, R.L., Kjeldsen, K.U., Schreiber, L., Gorby, Y. A., El-Naggar, M. Y., Leung, K. M., Schramm, A., Risgaard-Petersen, N., & Nielsen, L. P. (2012). Filamentous bacteria transport

- electrons over centimetre distances. *Nature*, *491*, 218–221. doi: 10.1038/nature11586
- Pham, C. A., Jung S. J., Phung, N. T., Lee, J., Chang, I.S., Kim, B. H., Yi, H., & Chun, J. (2003). A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Aeromonas hydrophila*, isolated from a microbial fuel cell. *FEMS Microbiology Letters*, *223*, 129–134. doi:10.1016/S0378-1097(03)00354-9
- Phillips, D. A., Ferris, H., Cook, D. R., & Strong, D. R. (2003). Molecular control points in rhizosphere food webs. *Ecology*, *84*, 816–826. doi: 10.1890/0012-9658(2003)084[08416:MCPIRF]2.0.CO;2
- Pietrelli, A., Micangeli, A., Ferrara, V., & Raffi, A. (2014). Wireless Sensor Network Powered by a Terrestrial Microbial Fuel Cell as a Sustainable Land Monitoring Energy System. *Sustainability*, *6*(10), 7263–7275. doi: 10.3390/su6107263
- Pinto, D. (2016). Electronic transfer within a microbial fuel cell. Better understanding of Experimental and Structural Parameters at the Interface between Electro-active Bacteria and Carbon-based Electrodes. Material chemistry. Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Pirbadian, S., Barchinger, S. E., Leung, K. M., Byun, H. S., Jangir, Y., Bouhenni, R. A., Reed, S. B., Romine, M. F., Saffarini, D. A., Shi, L., Gorby, Y. A., Golbeck, J. H., & El-Naggar, M. Y. (2014). *Shewanella oneidensis* MR-1 nanowires are outer membrane and periplasmic extensions of the extracellular electron transport components. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*, 12 883–12 888. doi:10.1073/pnas.1410551111
- Piyare, R., Murphy, A. L., Tosato, P., & Brunelli, D. (2019). Plug into a plant: using a plant microbial fuel cell and a wake-up radio for an energy neutral sensing system. IEEE Proceedings of 2017 IEEE 42nd conference on local computer networks workshops (LCN workshops), 2017 Oct 9 Singapore. IEEE Press, 18–25.
- Pocaznoi, D., Calmet, A., Etcheverry, L., Erable, B., & Bergel, A. (2012). Stainless steel is a promising electrode material for anodes of microbial fuel cells. *Energy & Environmental Science*, *5*, 9645–9653. doi: 10.1039/C2EE22429A

- Potter, M. C. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 84, 260–267. doi: 10.1098/rspb.1911.0073
- Prasad, D., Arun, S., Murugesan, M., Padmanaban, S., Satyanarayanan, R. S., Berchmans, S., & Yegnaraman, V. (2007). Direct electron transfer with yeast cells and construction of a mediatorless microbial fuel cell. *Biosensors & Bioelectronics*, 22, 2604–2610 doi: 10.1016/j.bios.2006.10.028
- Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S. D., Verhaege, M., & Verstraete, W. (2004). Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Applied and Environmental Microbiology*, 70, 5373–5382. doi: 10.1128/AEM.70.9.5373-5382.2004
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnology*, 23, 291–298. doi: 10.1016/j.tibtech.2005.04.008
- Rabaey, K., Van De Sompel, K., Maignien, L., Boon, N., Aelterman, P., Clauwaert, P., De Schampelaire, L., Pham, H. T., Vermeulen, J., Verhaege, M., Lens P., & Verstraete, W. (2006). Microbial fuel cells for sulfide removal. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5218–5224. doi: 10.1021/es060382u
- Rabaey, K., Rodríguez, J., Blackall, L. L., Keller, J., Gross, P., Batstone, D., W. Verstraete, W., & Nealson, K. H. (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities. *The ISME Journal*, 1, 9–18. doi: 10.1038/ismej.2007.4
- Rabus, R., Hansen, T., & Widdel, F. (2000). Dissimilatory Sulfate- and Sulfur-Reducing Prokaryotes. In Dworkin, M. *The Prokaryotes: An Evolving Electronic Resource for the Microbiological Community*. Springer-Verlag, NewYork.
- Rawson, F., Gross, A., Garrett, D., Downard, A., & Baronian, K. (2012). Mediated electrochemical detection of electron transfer from the outer surface of the cell wall of *S. cerevisiae*. *Electrochemistry Communications*, 15, 85-87. doi: 10.1016/j.elecom.2011.11.030

- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. CRC Press, New York.
- Regmi, R. (2017). Examining different classes of plants under various operating conditions for bioelectricity production. *Plant microbial fuel cell*. Dissertation. Thammasat University, Thailand.
- Reguera, G., McCarthy, K. D., Mehta, T., Nicoll, J. S., Tuominen, M. T., & Lovley, D. R. (2005). Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature*, *435*, 1098–1101. doi:10.1038/nature03661
- Reguera, G. (2018). Harnessing the power of microbial nanowires. *Microbial Biotechnology*, *11*, 979–994. doi: 10.1111/1751-7915.13280
- Rezaei, F., Xing, D., Wagner, R., Regan, J. M., Richard, T. L., & Logan, B. E. (2009). Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell. *Applied and Environmental Microbiology*, *75*, 3673–3678. doi: 10.1128/AEM.02600-08
- Ren, Z., Ward, T. E., & Regan, J. M. (2007). Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture. *Environmental Science and Technology*, *41*, 4781–4786. doi: 10.1021/es070577h
- Richter, H., McCarthy, K., Nevin, K. P., Johnson, J. P., Rotello, V. M., & Lovley, D. R. (2008). Electricity generation by *Geobacter sulfurreducens* attached to gold electrodes. *Langmuir*, *24*, 4376–4379. doi: 10.1021/la703469y
- Risgaard-Petersen, N., Kristiansen, M., Frederiksen, R. B., Dittmer, A. L., Bjerg, J. T., Trojan, D., Kjeldsen, K. U., Schreiber, L., Gorby, Y. A., El-Naggar, M. Y., Leung, K. M., Schramm, A., Risgaard-Petersen, N., & Nielsen, L. P. (2015). Cable bacteria in freshwater sediments. *Applied & Environmental Microbiology*, *81*, 6003–6011. doi: 10.1038/nature11586
- Rohrback, G. H., Scott, W. R., & Canfield, J. H. (1962). Biochemical fuel cells. *Biological Fuel Cells and Their Applications*, 18–21. In: *Proceedings of the 16th Annual Power Sources Conference 1962*.
- Roller, S. D., Bennetto, H. P., Delaney, G. M., Mason, J. R., Stirling, J. L., & Thurston, C. F. (1984). Electron-transfer coupling in microbial fuel cells. 1. Comparison of

- redox-mediator reduction rates and respiratory rates of bacteria. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 34, 3–12. doi:10.1002/jctb.280340103
- Rosenbaum, M., & Schruder, U. (2010). Photomicrobial solar and fuel cells. *Electroanalysis*, 22, 844–855. doi:10.1002/elan.200800005
- Rossi, M., Tosato, P., Gemma, L., Torquati, L., Catania, C., Camalo, S., & Brunelli, D. (2017). Long range wireless sensing powered by plant-microbial fuel cell. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. IEEE press.
- Rotaru, A.-E., Shrestha, P. M., Liu, F., Nevin, K. P., & Lovley, D. R. (2014). Direct interspecies electron transfer during syntrophic growth of *Geobacter metallireducens* and *Methanosarcina barkeri* on ethanol. *Applied & Environmental Microbiology*, 80, 4599–4605. doi: 10.1128/AEM.00895-14
- Rothballer, M., Picot, M., Sieper, J T., Arends, B. A., Schmid, M., Hartmann, A., Boon, N., Buisman, C. J. N., Barrière, F., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Monophyletic group of unclassified-Proteobacteria dominates in mixed culture biofilm of high-performing oxygen reducing biocathode. *Bioelectrochemistry*, 106 (Part A), 167-176. doi: 10.1016/j.bioelechem.2015.04.004
- Rusyn, I. B. (2014). Bioelectricity of plant-microbe associations of urban soil in a park areas. In Proceeding of 1st International Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Oceans Countries» (25 October 2014, Tokyo, Japan), 2, 75–78. Tokyo University Press, Japan, Tokyo.
- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2018). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62 (2), 170-179. doi:10.14232/abs.2018.2.170-179
- Rusyn, I. B., Vakuliuk, V. V., & Burian, O. V. (2019). Prospects of use of *Caltha palustris* in soil plant-microbial eco-electrical biotechnology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(2), 233-38. doi:10.15421/021935.
- Rusyn, I. B., & Valko, B. T. (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20(3), 211-229. doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674.

- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2019). Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(1), 39-44. doi: 10.15421/021906.
- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2020). Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(1), 20-31. doi: 10.5755/j01.ere.m.76.1.22212
- Rusyn, I. B., Medvediev, O. V., Valko, B. T., & Nikitchuk, S.V. (2020a). Bioelektryka ekosystem lisiv, zabolochenykh luk ta ahroekosystem Zakhidnoi Ukrainy [Bioelectricity of forest ecosystems, wetland meadows and agroecosystems of Western Ukraine]. *Naukovi pratsi Lisivnychoi Akademii nauk Ukrainy*, 20, 33-44. (in Ukrainian). doi: 10.15421/412003.
- Rusyn, I. B., Medvediev, O. V., & Valko, B. T. (2020b). Multi-electrode PMFC and their serial and parallel connections enhance bioelectricity parameters. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323-1334. doi: 10.1007/s13762-020-02934-3
- Saba, B., Khan, M., Christy, A. D., & Kjellerup, B. V. (2019). Microbial phyto-power systems – A sustainable integration of phytoremediation and microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 127, 1–11. doi: 10.1016/j.bioelechem.2018.12.005
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *A review Journal of Power Sources*, 356 (15), 225–244. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2018). *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. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126 (3), 404–410. doi: 10.1016/j.jbiosc.2018.03.00
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2019). An Insight into Plant Microbial Fuel Cells. In Krishnaraj, R. N. & Sani, R. K. (Eds). *Bioelectrochemical Interface Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9781119611103.ch8
- Sayed, E. T., & Abdelkareem, M. A. (2017). Yeast as a Biocatalyst in Microbial Fuel Cell, Old Yeasts - New Questions, Candida Lucas and Celia Pais, IntechOpen. doi:

- 10.5772/intechopen.70402. Available from:
<https://www.intechopen.com/books/old-yeasts-new-questions/yeast-as-a-biocatalyst-in-microbial-fuel-cell>
- Saz, C., Ture, C., Turker, O. C, & Yakar, A. (2018). Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell (CW-MFC) treating synthetic wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 8777–8792. doi: 10.1007/s11356-018-1208-y
- Schievano, A., Colombo, A., Grattieri, M., Trasatti, S. P., Liberale, A., Tremolada, P., Pino, C., & Cristiani, P. (2017). Floating microbial fuel cells as energy harvesters for signal transmission from natural water bodies. *Journal Power Sources*, 340, 80–88. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.037
- Schroder, U. (2007). Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Journal of Physical Chemistry*, 9, 2619–2629. doi: 10.1039/b703627m
- Schultz, K. (2014). Dutch company powers streetlights with living plants; will your cell phone be next? Posted November 21, 2014, from: <http://www.yesmagazine.org/planet/dutch-company-powers-streetlights-with-living-plants-will-your-cellphone-be-next>.
- Sekar, N., Wu, C.-H., Adams, M. W. W., & Ramasamy, R. P. (2017). Electricity generation by *Pyrococcus furiosus* in microbial fuel cells operated at 90°C. *Biotechnology & Bioengineering*, 114, 1419–1427. doi: 10.1002/bit.26271
- Sekrecka-Belniak, A., & Toczyłowska-Maminska, R. (2018). Fungi-Based Microbial Fuel Cells. *Energies* 11(10), 2827. doi: 10.3390/en11102827
- Sessitsch, A., Weilharter, A., Gerzabek, M. H., Kirchmann, H., & Kandeler, E. (2001). Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment. *Applied & Environmental Microbiology*, 67, 4215–4224. doi: 10.1128/aem.67.9.4215-4224.2001

- Shaw, L. J., Morris, P., & Hooker, J. E. (2006). Perception and modification of plant flavonoid signals by rhizosphere microorganisms. *Environmental Microbiology*, 8 (11), 1867–1880. doi:10.1111/j.1462-2920.2006.01141.x
- Shen, X., Zhang, J., Liu, D., Hu, Z., & Liu, H. (2018). Enhance performance of microbial fuel cell coupled surface flow constructed wetland by using submerged plants and enclosed anodes. *Chemical engineering journal*, 351, 312–318. doi: 10.1016/j.cej.2018.06.
- Sheng, Z., Mahapatra, C., Zhu, C., & Leung, V. C. M. (2015). Recent Advances in Industrial Wireless Sensor Networks Toward Efficient Management in IoT. *IEEE Access*, 3, 622–637. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2435000
- Shi, Y., Wang, Y., Mei, D., Feng, B., & Chen, Z. (2018). Design and Fabrication of Wearable Thermoelectric Generator Device for Heat Harvesting. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3, 373–378. doi: 10.1109/LRA.2017.2734241
- Shkil, H., Schulte, A., Guschin, D., & Schuhmann, W. (2011). Electron transfer between genetically modified *Hansenula polymorpha* yeast cells and electrode surfaces via Os-complex modified redox polymers. *ChemPhysChem*, 12, 806-813. doi: 10.1002/cphc.201000889
- Shukla, A. K., Suresh, P., Berchmans, S., & Rajendran, A. (2004). Biological fuel cells and their applications. *Current Science*, 87(4), 455–468. doi:10.20944/preprints201810.0763.v1
- Singh, B. K., Millard, P., Whiteley A. S., & Murrell J. C. (2004). Unravelling rhizosphere-microbial interactions: opportunities and limitations. *Trends Microbiology*, 12, 386–393. doi: 10.1016/j.tim.2004.06.008
- Sleutels, T. H. J. A., Hamelers, H. V. M., Rozendal, R. A., & Buisman, C. J. N. (2009). Ion transport resistance in microbial electrolysis cells with anion and cation exchange membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 3612–3620. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.004>
- Song, Y., Chen, Q., Ci, D., Shao, X., & Zhang, D. (2014). Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar. *BMC Plant Biology*, 14, 111. doi: 10.1186/1471-2229-14-111

- Sophia, A. C., & Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 59–66. doi:10.1016/j.seta.2017.05.001
- Sreekantha, D. K., & Kavya, K. A. (2017). Agricultural crop monitoring using IOT-A study, 134–139. In: Proceedings of the 2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 5–6 January 2017. Coimbatore, India. doi: 10.1109/ISCO.2017.7855968
- Srivastava, P., Gupt, S., Garaniya, V., & Yadav, A. (2018). Up to 399 mV bioelectricity generated by a rice paddy-planted microbial fuel cell assisted with a blue-green algal cathode. *Environmental Chemistry Letters*. doi: 10.1007/s10311-018-00824-2
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. doi:10.1002/er.1397
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001
- Suarez, F., Nozariasbmarz, A., Vashaee, D., & Ozturk, M. C. (2016). Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics. *Energy & Environmental Science*, 9, 2099–2113. doi: 10.1039/C6EE00456C
- Sudirjo, E., de Jager P., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2019). Performance and Long Distance Data Acquisition via LoRa Technology of a Tubular Plant Microbial Fuel Cell Located in a Paddy Field in West Kalimantan. Indonesia Sensors, 19, 4647, 1–18. doi:10.3390/s19214647
- Summers, Z. M., Fogarty, H. E., Leang, C., Franks, A. E., Malvankar, N. S., & Lovley, D. R. (2010). Direct exchange of electrons within aggregates of an evolved syntrophic coculture of anaerobic bacteria. *Science*, 330, 1413–1415. doi: 10.1126/science.1196526

- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, *74*, 1271–1273. doi: 10.1271/bbb.90852
- Tanaka, K., Yokoe, S., Igarashi, K., Takashino, M., Ishikawa, M., Hori, K., Nakanishi, S., & Kato, S. (2018). Extracellular Electron Transfer via Outer Membrane Cytochromes in a Methanotrophic Bacterium *Methylococcus capsulatus* (Bath). *Frontiers in Microbiology*, *29* (9), 1 - 7. doi: 10.3389/fmicb.2018.02905.
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2017). Evaluation of Sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, *108* (A), 203–210. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.08.017
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2018). A New Method for Sensing Soil Water Content in Green Roofs Using Plant Microbial Fuel Cells. *Sensors*, *18*, 71. doi: 10.3390/s18010071
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc. Publishers: Sunderland.
- Tender, L. M., Gray, S. A., Groveman, E., Lowy, D. A., Kauffman, P., Melhado, J., Tyce, R. C., Flynn, D., Petrecca, R., & Dobarro, J. (2008). The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, *179* (2), 571–575. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.123
- Ter Heijne, A., Hamelers, H. V. M., De Wilde, V., Rozendal, R. A., & Buisman, C. J. N. (2006). A bipolar membrane combined with ferric iron reduction as an efficient cathode system in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, *40*, 5200–5205. doi: 10.1021/es0608545
- Theodosiou, T. G. (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy & Buildings*, *35*(9), 909–917. doi: 10.1016/S0378-7788(03)00023-9
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology & Biotechnology*, *86*(3), 973–981. doi: 10.1007/s00253-010-2440-7

- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schlöter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012a). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, *94*(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Timmers, R.A., Strik, D. P. B. T. B., Arampatzoglou, C., Buisman, C. J. N., & Hamelers, H. V. M. (2012b). Rhizosphere anode model explains high oxygen levels during operation of a *Glyceria maxima* PMFC. *Bioresource Technology*, *108*, 60-67. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.088
- Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2013). Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass & Bioenergy*, *51*, 60–67. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.01.002
- Thomas, Y. R. J., Picot, M., Carer, A., Berder, O., Sentieys, O., & Barriere F., (2013). A single sediment-microbial fuel cell powering a wireless telecommunication system. *Journal of Power Sources*, *241*, 703–708. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.016
- Tou, I., Azri, Y. M., Sadi, M. H., Lounici, H., & Kebbouche-Gana, S. (2019). *Chlorophytum* microbial fuel cell characterization. *International Journal of Green Energy*, *16* (12), 1–13. doi: 10.1080/15435075.2019.1650049
- Tougas-Tellier, M. A., Morin, J., Hatin, D., & Lavoie, C. (2015). Freshwater wetlands: fertile grounds for the invasive *Phragmites australis* in a climate change context. *Ecology and evolution*, *5* (16), 3421–3435. doi: 10.1002/ece3.1576
- Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A., and Watanabe, K. (2016). Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, *06*(01),10–15. doi: 10.4236/jsbs.2016.61002
- Uren, N. C. (2001). Types, Amounts and Possible Functions of Compounds Released into the Rhizosphere by Soil Grown Plants. *The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil–Plant Interface*. Marcel Dekker, New York, 19–40.

- Van Bodegom, P. M., & Scholten, J. C. M. (2001). Microbial processes of CH₄ production in a rice paddy soil: model and experimental validation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *65*, 2055–2066. doi: 10.1016/S0016-7037(01)00563-4.
- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., & Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresour Technol*, *102*, 7036–7042. doi:10.1016/j.biortech.2011.04.033
- Venkidusamy, K., Megharah, M., Schroder, U., Karouta, F., Mohan, S.V., & Naidu R. (2015). Electron transport through electrically conductive nanofilaments in *Rhodospseudomonas palustris* strain RP2. *RSC Advances*, *5*, 100790–100798. doi: 10.1039/C5RA08742B
- von Canstein, H., Ogawa, J., Shimizu, S., & Lloyd, J. R. (2008). Secretion of flavins by *Shewanella* species and their role in extracellular electron transfer. *Applied & Environmental Microbiology*, *74*, 615–623 doi: 10.1128/AEM.01387-07
- Wakelin, S. A., Macdonald, L. M., Rogers, S. L., Gregg, A. L., Bolger, T. P., & Baldock, J. A. (2008). Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils. *Soil Biology & Biochemistry*, *40*, 803–813. doi: 10.1016/j.soilbio.2007.10.015
- Walker, T. S., Bais, H. P., Grotewold, E., & Vivanco, J. M. (2003). Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiology*, *132*, 44–51. doi: 10.1104/pp.102.019661
- Walter, X. A., Stinchcombe, A., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2017). Urine transduction to usable energy: A modular MFC approach for smartphone and remote system charging. *Applied Energy*, *192*, 575–581. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.006
- Walter, X. A., Merino-Jiménez, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2018). PEE POWER[®] urinal II – Urinal scale-up with microbial fuel cell scale-down for improved lighting. *Journal of Power Sources*, *15*(392), 150–158. doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.047
- Wang, X., Cheng, S., Feng, Y., Merrill, M. D., Saito, T., & Logan, B. E. (2009). Use of Carbon Mesh Anodes and the Effect of Different Pretreatment Methods on Power

- Production in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 43, 6870–6874. doi:10.1021/es900997w
- Wang, C., Guo, L., Li, Y., & Wang, Z. (2012). Systematic Comparison of C3 and C4 Plants Based on Metabolic Network Analysis. *BMC Systems Biology*, 6 (Suppl 2), S9-S9. doi: 10.1186/1752-0509-6-S2-S9
- Wang, L.-Y., Nevin, K. P., Woodard, T. L., Mu, B.-Z., Lovley, D. R. (2016). Expanding the diet for DIET: electron donors supporting direct interspecies electron transfer (DIET) in defined co-cultures. *Frontiers in Microbiology*, 7, 236. doi: 10.3389/fmicb.2016.00236
- Wang, J., Song, X., Wang, Y., Bai, J., Li, M., Dong, G., Lin, F., Lv, Y., & Yan, D. (2017). Bioenergy generation and rhizodegradation as affected by microbial community distribution in a coupled constructed wetland-microbial fuel cell system associated with three macrophytes. *Science of the Total Environment*, 607–608, 53–62. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.243
- Watanabe, K. & Nishio, K. (2010). Electric Power from Rice Paddy Fields. In: Ng, A., & Nathwani, J. (Eds). *Paths to Sustainable Energy*. IntechOpen. doi: 10.5772/12929
- Wei, J., Liang, P., & Huang, X. (2011). Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresour. Technol.*, 102(20), 9335–9344. doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.019
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137, 151–157. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.006
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015b). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, 83, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006
- Wetser, K. (2016). Electricity from wetlands: Technology assessment of the tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode. Part two: PMFCs applied

- in wetlands. Wageningen University, Wageningen. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.006
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. P. B. T. B. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, *185*, 642-649. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122
- Wilkinson, S. (2000). “Gastrobots” – Benefits and Challenges of Microbial Fuel Cells in FoodPowered Robot Applications. *Autonomous Robots*, *9*(2), 99–111. doi: 10.1023/A:10089845
- Williams, K. R. (1966). *An Introduction to Fuel Cells*. Elsevier, Amsterdam.
- Wu, Y., Yang, Z., Lin, F., & Xu, W. (2018). Towards Batteryfree and Wireless Sensing for Personalized Ultraviolet Exposure Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, *18*, 5515–5521. doi: 10.1109/JSEN.2018.2836332
- Xing, D., Zuo, Y., Cheng, S., Regan, J. M. & Logan, B. E. (2008). Electricity generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1. *Environmental Science & Technology*, *42*, 4146–4151. doi: 10.1021/es800312v
- Xu, S., Jangir, Y., & El-Naggar, M. Y. (2016). Disentangling the roles of free and cytochrome-bound flavins in extracellular electron transport from *Shewanella oneidensis* MR-1. *Electrochimica Acta*, *198*, 49–55.
- Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, *47*, 126–131. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.06.029
- Yamada, T., Sekiguchi, Y., Hanada, S., Imachi, H., Ohashi, A., Harada, H., & Kamagata, Y. (2006). *Anaerolinea thermolimosa* sp. nov., *Levilinea saccharolytica* gen. nov., sp. nov. and *Leptolinea tardivitalis* gen. nov., sp. nov., novel filamentous anaerobes, and description of the new classes *Anaerolineae* classis nov. and *Caldilineae* classis nov. in the bacterial phylum *Chloroflexi*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, *56*, 1331–1340. doi: 10.1099/ijs.0.64169-0

- Yamasaki, R., Maeda T., & Wood, T. K. (2018). Electron carriers increase electricity production in methane microbial fuel cells that reverse methanogenesis. *Biotechnology for Biofuels*, *11*, 211-221. doi: 10.1186/s13068-018-1208-7
- Yan, Z., Jiang, H., Cai H., Zhou, Y., & Krumholz, L. R. (2015). Complex interactions between the macrophyte *Acorus calamus* and microbial fuel cells during pyrene and benzo[a] pyrene degradation in sediments. *Scientific Reports*, *5*, 10709. doi: 10.1038/srep10709
- Yan, D., Song, X., Weng, B., Yu, Z., Bi W., & Wang, J. (2018). Bioelectricity generation from air-cathode microbial fuel cell connected to constructed wetland. *Water Science & Technology*, *78* (9). doi: 10.2166/wst.2018.471
- Yang, Y., Zhao, Y., Tang, C., Xua, L., Morgan, D., & Liu R. (2019). Role of macrophyte species in constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and bioenergy generation. *Chemical Engineering Journal*, *392*, 123708 doi:10.1016/j.cej.2019.123708
- Yasri, N. G., & Nakhla, G. (2016). Electrochemical Behavior of Anode-Respiring Bacteria on Doped Carbon Electrodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *8*, 35150-35162. doi: 10.1021/acsami.6b09907
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, *42*(31), 7266-7273. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.003
- Yao, S. J., Appleby, A. J., Geise, A., Cash, H. R., & Wolfson, S. K. (1969). Anodic oxidation of carbohydrates and their derivatives in neutral saline solution. *Nature*, *224*, 921-922.
- Zaichikova, M. V., Berestovskaya, Yu. Yu., Akimov, V. N., Kizilova, A., & Vasilieva, L. V. (2012). *Xanthobacter xylophilus* sp. nov., a member of the xylotrophic mycobacterial community of low-mineral oligotrophic waters. *Microbiology*, *79* (1), 83-88. doi: 10.1134/S002626171001011X
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet Things Journal*, *1*, 22-32. doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328

- Zhao, F., Harnisch, F., Schroeder, U., Scholz, F., Bogdanoff, P., & Herrmann, I. (2006). Challenges and constraints of using oxygen cathodes in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, *40*, 5193-5199. doi: 10.1021/es060332p
- Zhang, F, Tian, L., & He Z. (2011). Powering a wireless temperature sensor using sediment microbial fuel cells with vertical arrangement of electrodes. *Journal of Power Sources*, *196*, 9568–9573. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.07.037
- Zhang, F., Ge, Z., Grimaud, J., Hurst, J., & He, Z. (2013). Improving electricity production in tubular microbial fuel cells through optimizing the anolyte flow with spiral spacers. *Bioresource Technology*, *134*, 251-256, doi:10.1016/j.biortech.2013.02.010
- Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J. R., Chandra, A., Avignone-Rossa, C., Thumser, A.E., & Slade, R.C.T. (2008). Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, *42*, 4971-4976. doi:10.1021/es8003766
- Zhang, L., Zhou, S., Zhuang, L., Li, W., Zhang, J., Lu, N., & Deng, L. (2008). Microbial fuel cell based on *Klebsiella pneumoniae* biofilm. *Electrochemistry Communication*, *10*, 1641–1643. doi: 10.1016/j.elecom.2008.08.030
- Zhang, F., Ge, Z., Grimaud, J., Hurst, J., & He, Z. (2013a). *In situ* investigation of tubular microbial fuel cells deployed in an aeration tank at a municipal wastewater treatment plant. *Bioresource Technology*, *136*, 316-321. doi: 10.1016/j.biortech.2013.02.107
- Zhang, F., Ge, Z., Grimaud, J., Hurst, J., & He, Z. (2013b). Long-Term Performance of Liter-Scale Microbial Fuel Cells Treating Primary Effluent Installed in a Municipal Wastewater Treatment Facility. *Environmental Science & Technology*, *47*, 4941-4948. doi: 10.1021/es400631r
- Zhuang, L., Yuan, Y., Wang, Y., & Zhou, S. (2012). Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater. *Bioresource Technology*, *123*, 406–412. doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.038

- Zinchenko, O. I., Salatenko, V. N., & Bilonozhko, M. A. (2001). *Roslynnnytstvo* [Plant Growing]. Ahrarna osvita, Kyiv (in Ukrainian).
- Zuo, Y., Xing, D., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2008). Isolation of the exoelectrogenic bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by using a U-tube microbial fuel cell. *Applied & Environmental Microbiology*, 74, 3130-3137. doi: 10.1128/AEM.02732-07

Розділ 2. Методика досліджень та умови експериментів

2.1 Біологічні компоненти рослинно-мікробних біосистем

Для вивчення генерації рослинно-мікробної біоелектрики *in situ* та в будинках було обрано найбільш поширені види рослин заходу України. Загалом було досліджено біоелектричні параметри природних біотопів з 45-ма видами рослин *in situ*. На основі 15-ти видів рослин було розроблено біосистеми для досліджень у енергоефективних будинках всередині та на їх балконах, терасах і дахах.

У розділі 3 об'єктом дослідження була генерація біоелектрики 25-ти різних видів рослин та пов'язаних з ними угруповань мікроорганізмів (фітомікробценозів) *in situ* та в лабораторних умовах. Експерименти проводилися у лабораторії та у лісових і садових екосистемах сіл Волощина Перемишлянського району Львівської області, Прилісне Маневицького району Волинської області *in situ* протягом 10-ти днів у вересні 2013 року. Із 3-кратною повторністю досліджувалися біоелектричні показники ґрунтової мікрофлори лісових дерев: сосни лісової *Pinus silvestris* L., дуба звичайного *Quercus robur* L., бука лісового *Fagus sylvatica* L., граба звичайного *Carpinus betulus* L., берези пониклої *Betula pendula* Roth., берези пухнастої *Betula pubescens* Ehrh., вільхи чорної *Alnus glutinosa* (L.) Gaerth.; і садових дерев: вишні звичайної *Prunus cerasus* L., сливи домашньої *Prunus domestica* L., яблуні домашньої *Malus domestica* Borkh., груші звичайної *Pyrus communis* L., горіха волоського *Juglans regia* L., калини *Viburnum opulus* L. та садових кущів: малини звичайної *Rubus idaeus* L., смородини чорної *Ribes nigrum* L., порічок червоних *Ribes rubrum* L., агруса звичайного *Ribes uva-crispa* L., винограда звичайного *Vitis vinifera* L. В лабораторних умовах було досліджено біоелектричні показники ґрунтової мікрофлори наступних кімнатних рослин, що вирощувались у горщиках: ліани плюща звичайного *Hedera helix* L., кімнатної пальми Хамедорея вишуканої *Chamaedorea elegans* Mart. (1830), спатіфілума ланцетолистого *Spathiphyllum*

lanceifolium (Jacq.) Schott, клівії благородної *Clivia nobilis* Lindl., валотти кіноварної *Vallota miniata* Lindl., товстянки яйцеподібної *Crassula ovata* (Miller) Druce (1917), диффенбахії плямистої *Dieffenbachia seguine* (Jacq.) Schott. Для вивчення біоелектричних показників мультиелектродних систем використовували рослини калюжниці болотяної *Caltha palustris* L., ряски малої *Lemna minor*, базиліка кімнатного *Ocimum basilicum* та солейролії гелксини *Helcine soleirolii* в лабораторних умовах.

В експериментах розділу 4.1 об'єктом досліджень була генерація біоелектрики фітомікробіоценозів найбільш поширених на заході України екосистем лісових масивів, заболочених луків, сільсько-господарських садів та агрокультур. Всього було проаналізовано біотопи, сформовані 32-ма найбільш розповсюдженими видами. Експерименти проводилися у лісах, заболочених луках та сільсько-господарських угіддях трьох регіонів на заході України Волинського Полісся, Львівського Опілля і Карпат, Івано-Франківщина: сіл Волощина Перемишлянського району Львівської області, селі Прилісне Маневицького району Волинської області та села Кривопілля Верховинського району Івано-Франківської області (на межі Покутсько-Буковинських Карпат і Чорногори) (рис. 2.1.1). Вимірювання біоелектричного потенціалу проводилося *in situ* з 50-ма зразками кожного виду протягом 150-ти днів.

Об'єктом досліджень в лісових екосистемах була генерація біоелектрики фітомікробіоценозів сосни лісової *Pinus silvestris* L. та дуба звичайного *Quercus robur* L., переважаючих видів в лісах України, а також, бука лісового *Fagus sylvatica* L., берези повислої *Betula pendula* Roth., вільхи чорної *Alnus glutinosa* (L.) Gaerth. та граба звичайного *Carpinus betulus* L., частка яких досить значна у складі дерев лісових масивів України (Воднар, 2016) (рис. 2.1.2, рис. 2.1.3). Діаметр стовбурів досліджуваних дерев в середньому становив 0.25 м – 0.47 м і подекуди сягав до 1 м. Ґрунт біля дерев був вкритий шаром органічного опаду листя чи хвої, мохом чи невеликим трав'яним покривом.

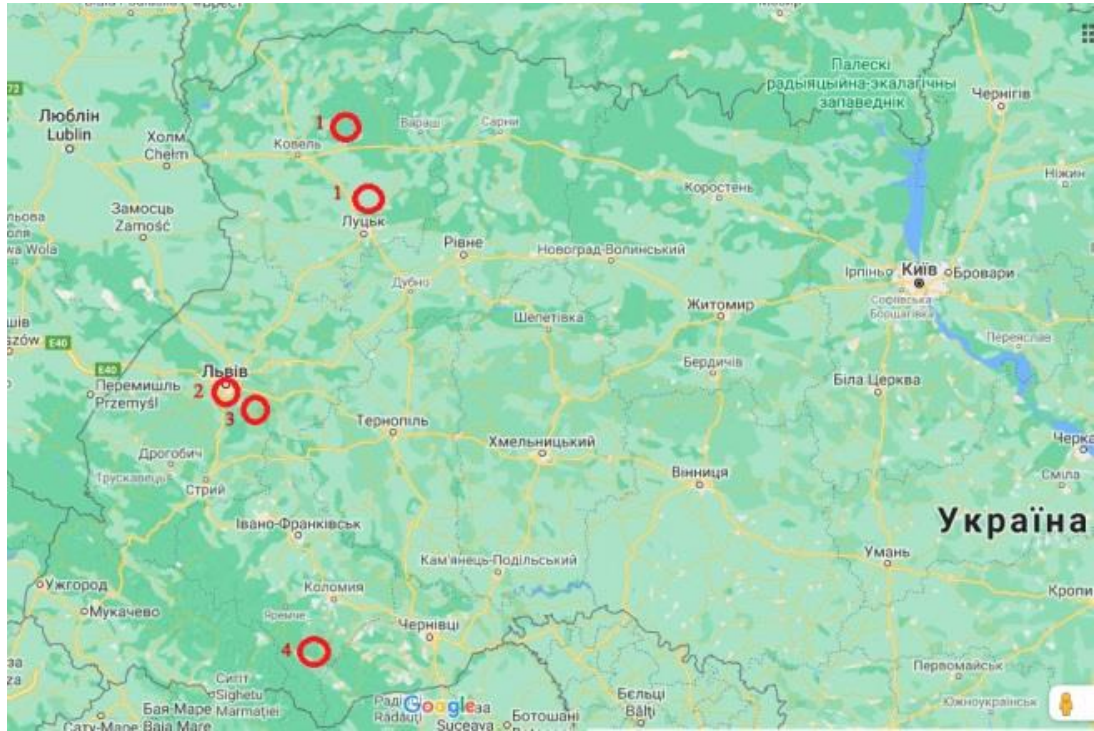


Рис. 2.1.1 Місця проведення експериментів *in situ* на заході України
1 – Волинське Полісся, 2 – м. Львів,
3 – Львівське Опілля, 4 – Карпати, Івано-Франківщина

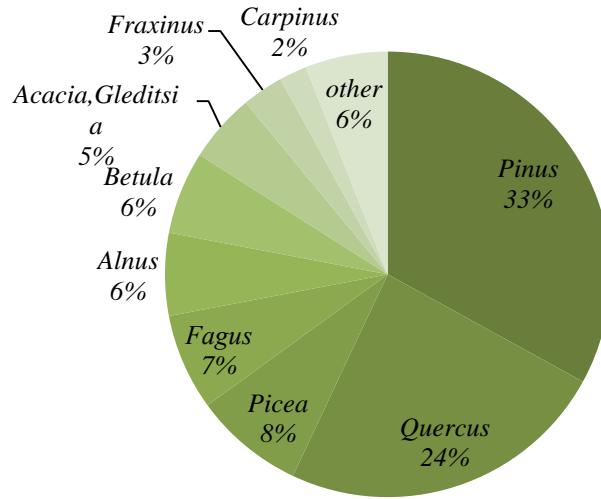


Рис. 2.1.2 Розподіл площі лісів України за переважаючими деревними породами (Vodnar, 2016, Державне агентство лісових ресурсів України). Найбільш поширені деревні породи були обрані для моніторингу за показниками біоелектрики

Об’єктом досліджень в агроєкосистемах була генерація біоелектрики типових фітомікробоценозів фруктових садів, а також, однорічних

сільськогосподарських культур: садових дерев, з діаметром стовбура в середньому 0.10 – 0.35 м, вишні звичайної *Prunus cerasus* L., сливи домашньої *Prunus domestica* L., яблуні домашньої *Malus domestica* Borkh., груші звичайної *Pyrus communis* L., горіха волоського *Juglans regia* L.; садових кущів, висотою в середньому 1.32 м – 1.95 м, таких як смородини чорної *Ribes nigrum* L., порічок червоних *Ribes rubrum* L., малини звичайної *Rubus idaeus* L., агруса звичайного *Ribes uva-crispa* L., калини *Viburnum opulus* L., висотою в середньому 2.58 м – 3.42 м, винограда звичайного *Vitis vinifera* L., довжиною в середньому 1.74 м – 3.04 м; агрокультур, як низькорослих, таких як цибулі городньої *Allium cepa* L., петрушки кучерявої *Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss, моркви посівної *Daucus carota* subsp. *sativus*, буряка столового *Beta vulgaris* L., капусти городньої *Brassica oleracea* L., кабачка звичайного *Cucurbita pepo* var. *giraumontia*, гарбуза звичайного *Cucurbita pepo* L., так і високорослих сільсько-господарських культур, таких як огірка звичайного *Cucumis sativus* L., перця овочевого *Capsicum annuum* L. і кукурудзи цукрової *Zea mays* L.



Рис. 2.1.3 Типова дослідна ділянка соснового лісу неподалік села Прилісного, де стаціонарно монтувалися електродні системи для спостережень за біоелектричними параметрами

В екосистемах заболочених луків як об'єкт дослідження була генерація біоелектрики фітомікробоценозів наступних видів рослин: осоки шершаволистої *Carex hirta* L., осоки трясучковидної *Carex brizoides* L., куги озерної *Scirpus lacustris* L., тонконога болотяного *Poa palustris* L. та калюжниці болотяної *Caltha palustris* L.

Об'єктом досліджень для експериментів 4.2 була генерація біоелектрики фітомікробоценозів паркових урбоекосистем 10-ти видів дерев, що найбільш широко представлені у парках Львова та України (Fedorovskyy et al., 2013; Ivanchenko & Bessonova, 2015; Denysyuk, 2018): клен білий *Acer pseudoplatanus* L., граб звичайний *Carpinus betulus* L., ясен пухнастий *Fraxinus pubescens* L., бук лісовий *Fagus sylvatica* L., в'яз гладкий *Ulmus laevis* Pall., гіркокаштан *Aesculus hippocastanum* L., липа серцеволиста *Tilia cordata* Mill., береза повисла *Betula pendula* Roth., тополя чорна *Populus nigra* L. та в'яз граболистий *Ulmus carpinifolia* Gled. Діаметр стовбурів дерев в середньому становив 0. 41 м. Ґрунт біля дерев був вкритий газонною травою або шаром органічного опаду листя чи був повністю витоптаний і позбавлений трав'яного покриву. Вимірювання біоелектричного потенціалу проводилося з 30-ма зразками кожного виду дерев *in situ* протягом 150-ти днів.

Об'єктом досліджень для експериментів 4.3 була генерація біоелектрики мікробофітоценозів техногенно забруднених ділянок газонів розділяючих смуг вздовж міських автотрас міста Львова із високим та середнім типом навантаження, а також насадження вздовж локальної автотраси села Волощина Перемишлянського району Львівської області та села Прилісного Маневицького району Волинського Полісся. Контрольними були мікробофітоценози газонних трав без будь якого впливу викидів автомобілів. Електродні системи реєстрації біоелектричного потенціалу ґрунтових мікроорганізмів, асоційованих з рослинами монтувалися у розділяючі автотраси смуги, засаджені газонними міськими травами такими як, райграс пасовищний *Lolium perenne* L., костриця очеретяна *Festuca arundinacea* Schreb. і тонконіг луговий *Poa pratensis* L., 1753. В кожній дослідній ділянці було вмонтовано по 10 електродних систем для

моніторингу за біоелектричним потенціалом. Було проаналізовано біоелектрику 10-ти зон зелених розділяючих смуг на вулицях митрополита Андрея, проспекту Чорновола та вулиці Хуторівка та 10-ти ділянок, вздовж локальних сільських автотрас впродовж 70-ти днів.

Генерація біоелектрики фітомікробіоценозу водного подорожника, інша назва частухи подорожникової, *Alisma plantago-aquatica* L., болотистої рослини, широко поширеної по всіх континентах, як у північних, так і у південних регіонах земної кулі (Tsvelev, 1981; Grigoryev et al., 2006), як біокомпонента 20-ти електробіотехнологічних систем протягом року, була об'єктом дослідження в експериментах 5. Сульфатредуючі сіркобактерії *Desulfovibrio sp. Yav-6* (Moroz & Rusyn, 2012), виділені із Яворівського кар'єру Львівської області, розташованого на місці колишнього кар'єру з видобутку сірки було обрано для дослідження як біологічного підсилювача роботи біосистем з водним подорожником.

Об'єктом дослідження експериментів 6 була генерація біоелектрики мікробіоценозу костриці очеретяної *Festuca arundinacea* Schreb. в складі електробіотехнологічних систем протягом року (рис. 2.1.4). Експерименти проводилися із 20-ма біосистемами із *F. arundinacea*, широко поширеним видом трав, одним з найменш вимогливих щодо умов зростання, стресорезистентним та високопосухостійким протягом року (Ashraf & Harris, 2005; Bacon, 1993; Elmi & West, 1995).

Об'єктом дослідження експериментів 7 була генерація біоелектрики фітомікробіоценозів калюжниці болотяної *Caltha palustris* L. *in situ* в її природних заболочених місцезростаннях Волинського Полісся в селі Кульчин Турійського району Волинської області та в Карпатах у високогірному селі Кривопілля Верховинського району Івано-Франківської області на висоті 1013 м над рівнем моря, а також, в горщиках на терасах та балконах житлових будинків у м. Львові при внесенні в субстрат підсилювача біосистем анелід *Lumbricus terrestris* L. та без них. Вимірювання біоелектричних параметрів проводилося у 100-ти зразків *in situ* та в 10-ти біосистемних контейнерах біля будинків із *C. palustris*,

космополітичним першоцвітом, морозостійкою та болотистою рослиною протягом 100-та днів (Akhanı, 2014).

Об'єктом дослідження експериментів 8 була генерація біоелектрики фітомікробіоценозів електробіотехнологічних систем із морозостійкими мохами: кипарисовим лишайником *Hypnum cupressiforme* Hedw., зозулиним льоном *Polytrichum commune* Hedw. і левкобриєм сизим *Leucobryum glaucum* Hedw. Моніторинг проводився з 20-ма біосистемами із різними конфігураціями електродних систем на зелених дахах м. Львова на протязі 36 тижнів.

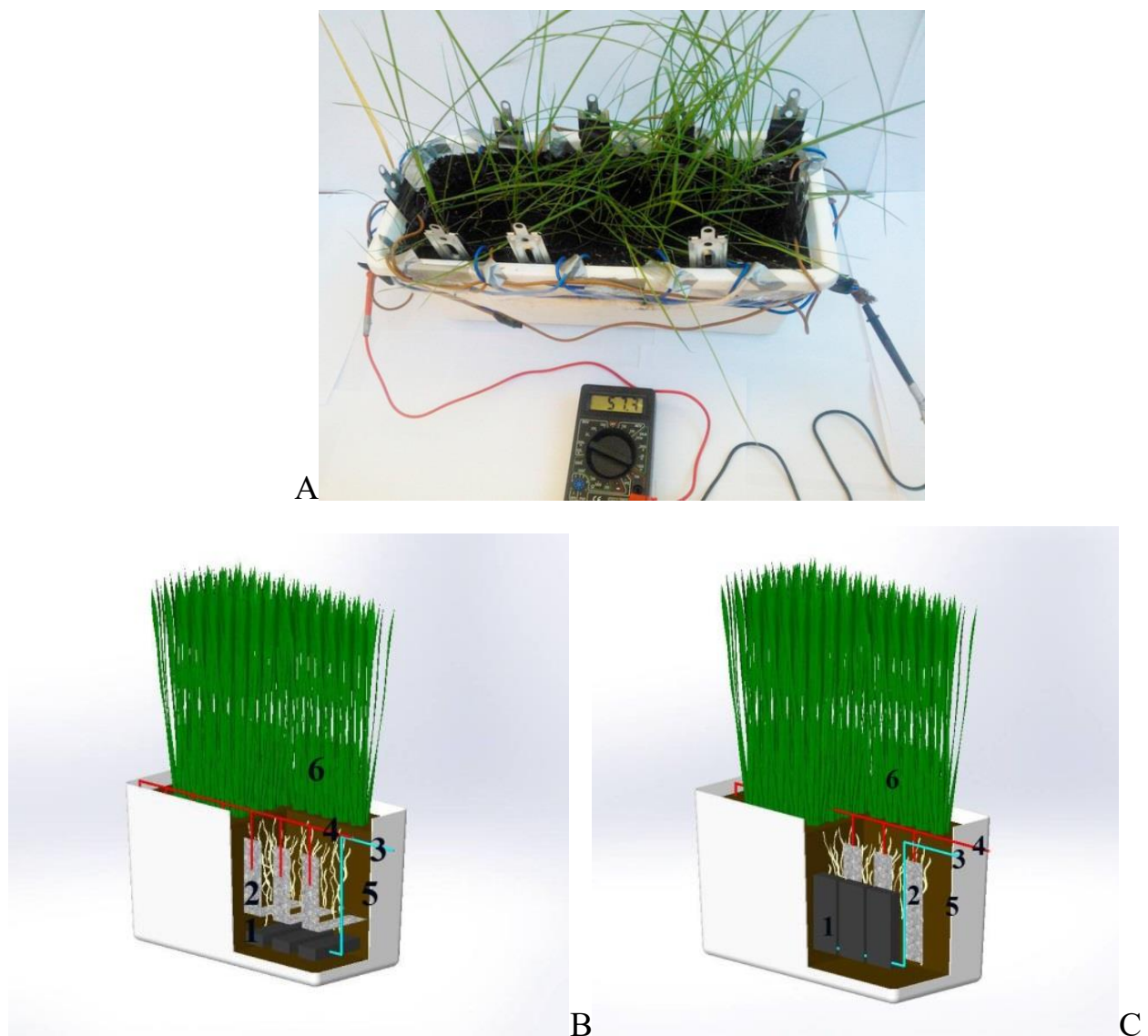


Рис. 2.1.4 Біосистема з *F. arundinacea*, (А) вимірювання сили струму,

(В, С) схеми з різними конфігураціями електродних систем:

1 – катоди, 2 – аноди, 3 – вихід дроту, що з'єднує систему катодів, 4 – вихід дроту, що з'єднує систему анодів, 5 – контейнер із субстратом, 6 – рослина.

Об'єктом дослідження експериментів 9 була біоелектрика 20-ти електробіотехнологічних систем з осокою шершаволистою *Carex hirta* як біологічним компонентом біосистеми, рослиною здатною рости у всіх кліматичних зонах земної кулі (Gubanov et al., 2002; Jermy et al., 2007) та водночас очищувати ґрунт і водойми (Wang et al., 2018), в тому числі від нафтозабруднень (Dzura et al., 2008; Rusyn et al., 2009) на протязі року на зелених дахах м. Львова.

2.2 Розробка електродних систем для збору мікробно-рослинної біоелектрики в біосистемах

В розділі 3 для вибору нових матеріалів як електродів нами були проаналізовані наступні пари електродів: графіт/алюміній, графіт/мідь, графіт/нержавіюча сталь, графіт/оцинкована сталь, алюміній/мідь, алюміній/оцинкована сталь.

Для створення двоелектродної системи для роботи у глибинних шарах ґрунту до вибраної пари електродів під'єднували полівінілхлорид-ізольовані мідні дроти наступним чином (Rusyn & Medvediev, 2016). Для цього в катоді здійснювали наскрізний отвір, в який поміщали зачищену частину мідного дроту, що закріплювали механічно, загинаючи дріт або запаюванням олов'яним сплавом чи за допомогою додаткових кріпильних елементів з нержавіючої сталі, а виступаючі назовні зачищені частини дроту вкривали ізоляційною стрічкою. До аноду дріт кріпили механічно, загинанням електроду довкола неізольованої частину дроту з наступним запаюванням олов'яним сплавом для уникнення втрат провідності. Як провідники використовували мідні багатожильні та одножильні дроти січенням 1.5 мм–3мм, необхідної довжини, вкриті полівінілхлоридною ізоляцією.

В подальших експериментах розділів 3 та 4.1 використовувалися обрані нами (Rusyn & Medvediev, 2016) графітові катоди та оцинковано-сталеві і алюмінієві аноди розміром, мм: 90(h) x 30(w) x 15(t) та 292(h) x 30(w) x 0.8(t) і 300(h) x 0.3(w) x 0.3(t), відповідно, для 5-літрових контейнерів; і для 600 мл-контейнерів катоди розміром 87(h) x 28(w) x 14 (t) і 55(h) x 14(w) x 5(t) та аноди розміром 58(h) x

29(w) x 1(t) i 78 (h) x 36 (w) x 1 (t), з під'єднаними до них мідними дротами, для аналізів на глибині у ґрунті, безпосередньо в зоні асоціації рослинного коріння та мікроорганізмів, де відбувається вивільнення електронів та протонів (рис. 2.2.1). Закінчення мідних дротів виводили на ґрунтову/водну поверхню.

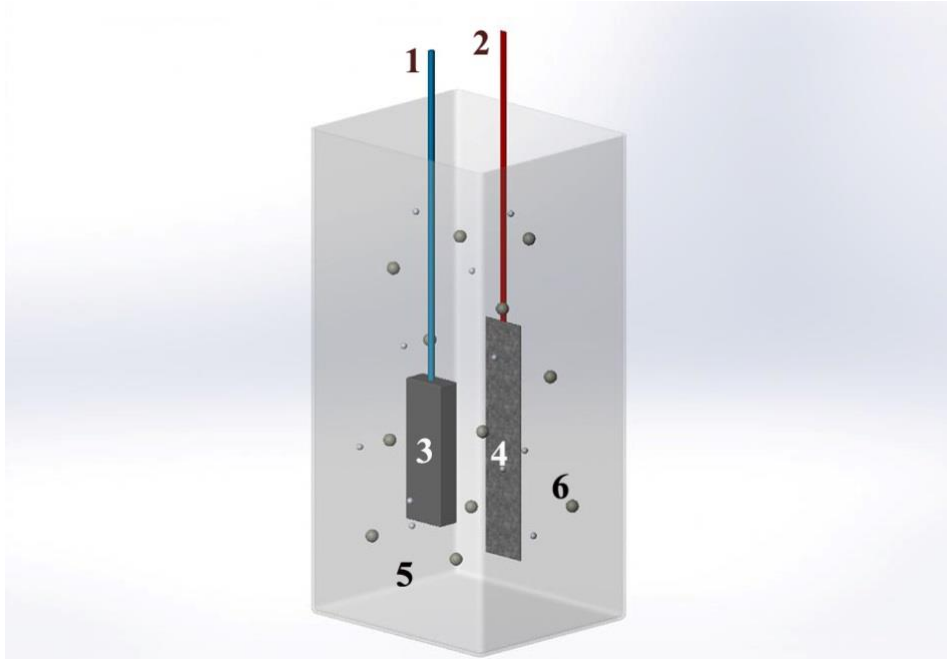


Рис. 2.2.1 Схематичне зображення монопарної системи електродів для визначення біоелектричного потенціалу у ґрунтах/водоймах в зоні асоціації ризосферних мікроорганізмів з рослинами:

1 – вихід дроту, що з'єднує катод; 2 – вихід дроту, що з'єднує анод;
3 – катод; 4 – анод; 5 – субстрат; 6 – ґрунтові електроактивні мікроорганізми.

Для експериментів розділів 3, 5, 6, 8, 9 нами була сконструйована мультиелектродна система збору та вимірювання біоелектрики (Rusyn & Medvediev, 2018), що складалась із систем електродів, які розташовувалися у пластикових контейнерах з висадженими рослинами безпосередньо в зоні асоціації рослинного коріння та електро-генеруючих ґрунтових мікроорганізмів, де відбувається вивільнення електронів та протонів. На рис. 2.2.2 представлена

мультиелектродна система, що використовувалася в експериментах розділів 3, 5 і 6.

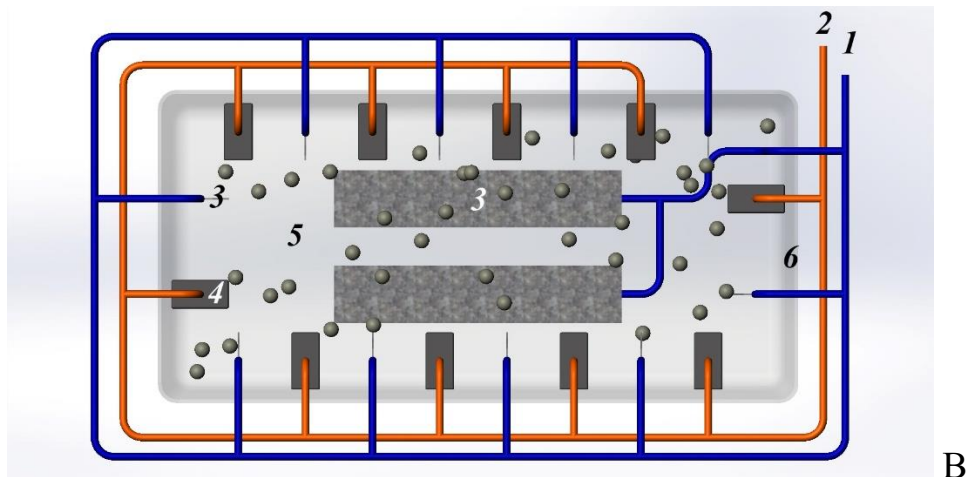
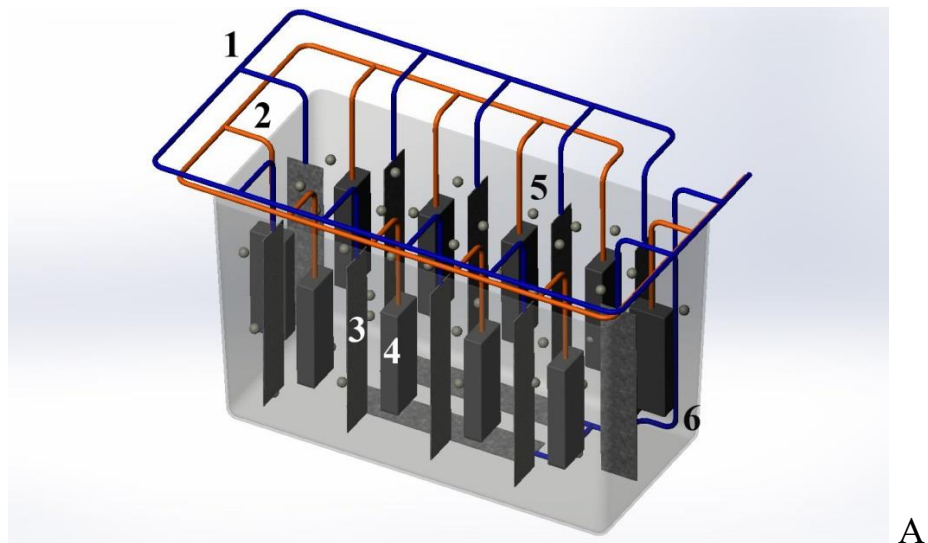


Рис. 2.2.2 Схематичне зображення розташування систем електродів в біосистемах з висадженою рослиною водним подорожником чи кострицею очеретяною: (А) фронтальний вигляд збоку контейнера, (В) вигляд згори контейнера: 1 – вихід дроту, що з'єднує систему з 12 анодів; 2 – вихід дроту, що з'єднує систему з 10 катодів; 3 – анод; 4 – катод; 5 – субстрат; 6 – контейнер.

Як аноди, використовували пластини з оцинкованої сталі розміром 292 (h) x 30 (w) x 0.8 (t) мм, як катоди – графітові пластини розміром 90 (h) x 30 (w) x 15 (t) мм (Rusyn & Medvediev, 2015). Як провідники застосовували мідні багатожильні дроти січенням 1.5 мм, необхідної довжини, якими з'єднували систему катодів та систему анодів між собою (Rusyn & Medvediev, 2016). Система катодів складалася

з 10-ти з'єднаних між собою дротами катодів та система анодів із 12-ти з'єднаних між собою анодів (експерименти розділів 3, 5, 6).

Система анодів одного контейнера розташовувалась у контейнері на відстані 0.05 м від його стінок наступним чином: 10 зігнутих на третину пластин в одній площині – вертикально вздовж стінок контейнера та 2 пластини – на дні контейнера (рис. 2.2.2).

Система катодів складалась з 10-ти графітів, з'єднаних між собою дротом та розташовувалась у контейнері між анодами вертикально на глибині 0.10 м та на відстані 0.05 м від вертикальних стінок контейнера чи палюдаріума (рис. 2.2.2). Виходи провідників з'єднували із зовнішнім електричним ланцюгом, що містить споживач енергії.

В експериментах розділу 3, 5-9 для біосистем в 5л контейнерах також використовували мультиелектродні системи з 10-ти катодів і 10-ти анодів, 10-ти катодів і 9-ти анодів, 9-ти катодів і 9-ти анодів, 8-ми катодів і 8-ти анодів, 8-ми катодів і 7-ми анодів. А також, в експериментах з біосистемами в 600 мл-контейнерах використовувалися мультиелектродні системи з 2-ма катодами і 2-анодами та 4-катодами і 4-анодами, сконструйовані за аналогічним принципом.

Для лабораторних експериментів розділу 7 використовувалися два графітових катода та один оцинковано-стальний анод (Rusyn & Medvediev, 2015) (рис. 2.2.3). Щоб охопити зону кореневих виділень графітові електроди були поміщені на глибині 0.15 м та 0.30 м, оцинковані сталеві електроди були поміщені на глибину 0.15-0.30 м. Для експериментів розділу 7 в польових умовах використовувався аналогічний комплекс катодів і аноду, які стаціонарно розміщувались в ґрунті для вимірювань значень біоелектричного потенціалу та сили струму (Rusyn & Medvediev, 2016).

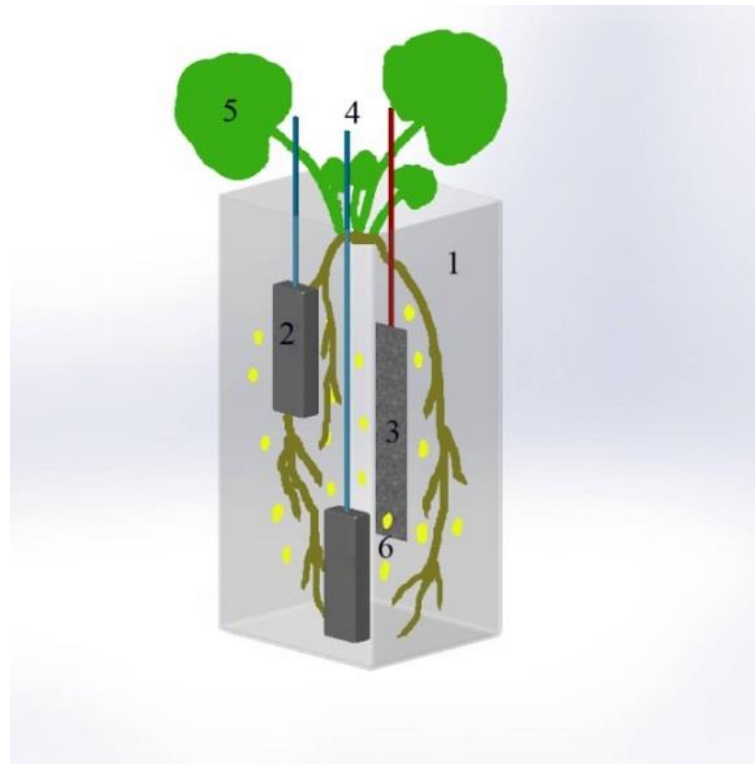


Рис. 2.2.3 Схема розміщення електродів в ґрунті *in situ* та на відкритих терасах і балконах будівель: 1 – ґрунтовий зразок з корінням *Caltha palustris*; 2 – катод; 3 – анод; 4 – дроти, під’єднані до електродів на глибині ґрунту та виведені на поверхню субстрату; 5 – рослини *C. palustris*; 6 – колонії електро-генеруючих мікроорганізмів

В пошуках найбільш оптимальної конфігурації електродної системи для експериментів розділу 8 та 9 нами було сконструйовано ряд різних схем мультиелектродних біосистем і випробувано в кліматичних умовах заходу України з різними типами рослин. Для цього в експериментах розділу 8 система катодів складалась з 8 графітів або з цілісної графітової плити (рис. 2.2.4). В біосистемах 1 – 4 катоди були з’єднані між собою дротом майже впритул в плити; в біосистемах 5 – катоди, були з’єднані провідником таким чином, що графіти перебували на відстані один від одного, для збільшення площі контакту катодів з ґрунтом. В біосистемах 6 катод представляв собою цілісну графітову плиту розміром 220 (h) x120 (w) x15 (t) мм, з’єднану з дротом. Катодні електродні системи розміщувалися горизонтально під ризоїдами рослин в біосистемах 1 – 4, а в біосистемі 5 і 6 – вертикально під ризоїдами рослин.

Система анодів складалась з 7 пластин, що були з'єднані між собою дротом та розташовувалась у контейнері наступним чином (рис.2.2.4).:

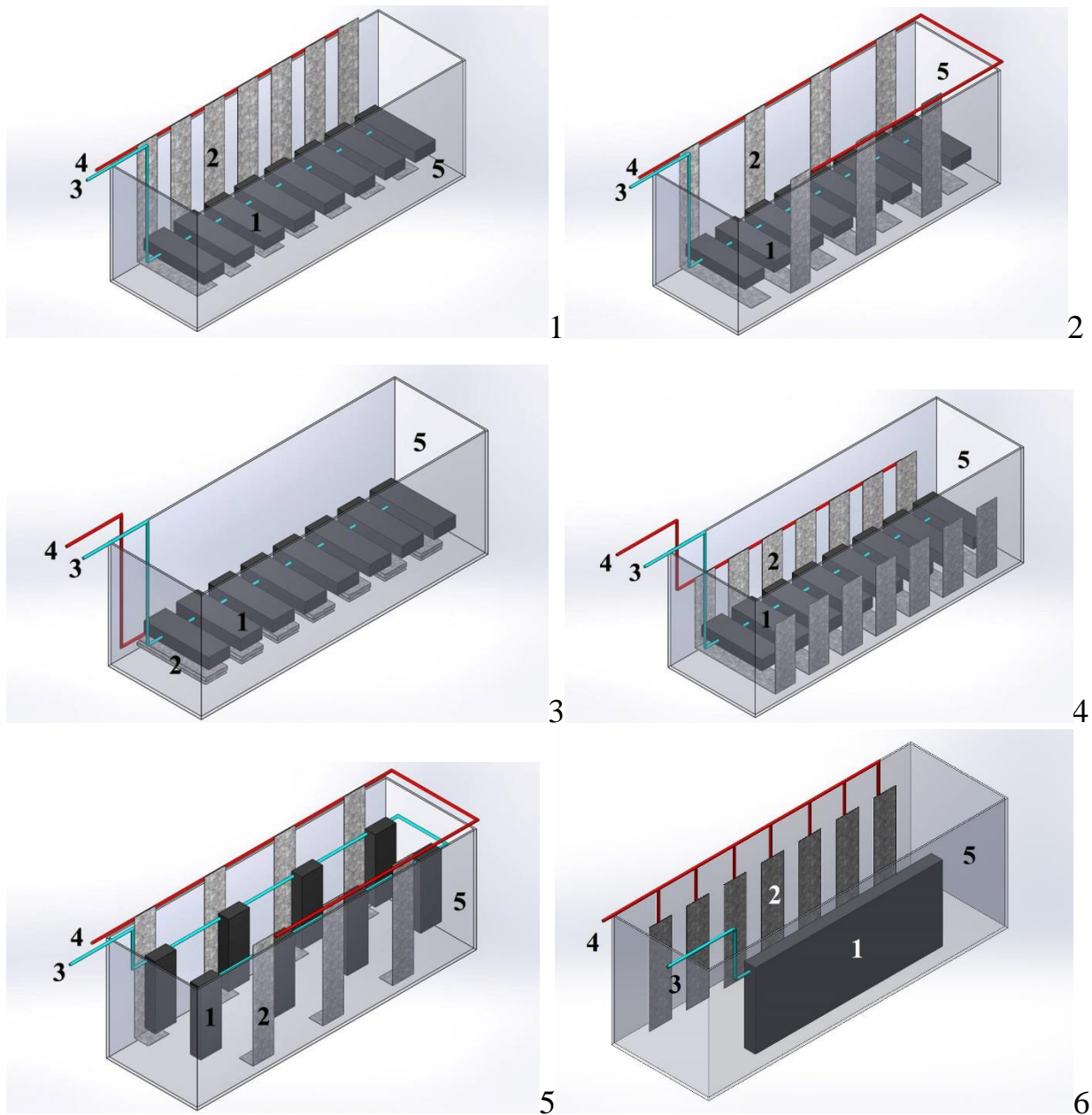


Рис. 2.2.4 Розташування систем катодів та анодів в біосистемах 1–6 з мохами:
 1 – катод, 2 – анод, 3 – вихід дроту, що з'єднує систему катодів, 4 – вихід дроту, що з'єднує систему анодів, 5 – контейнер

- у вигляді букви L з одної сторони катодів та під ними (1);
- у вигляді букви L почергово з двох боків від катодів (2);

- зігнуті втричі пластини у вигляді букви І під системою графітів (3);
- у вигляді букви П під катодами та з обох їх боків (4);
- у вигляді букви L навпроти катодів (5);
- зігнуті двічі пластини у вигляді букви І навпроти катодів (6).

В експериментах розділу 9 були випробувані три типи конфігурацій сконструйованих нами електродних систем (рис. 2.2.5). Кожна система електродів складалася з 8-ми графітових катодів та 7-ми оцинковано-стальних анодів (Rusyn & Medvediev, 2015), з'єднаних між собою мідними багатожильними дротами, січенням 1.5 мм (Rusyn & Medvediev, 2016). Аноди представляли собою пластини, зігнуті втричі у вигляді букви І та зігнуті під прямим кутом у вигляді літери L (рис. 2.2.5).

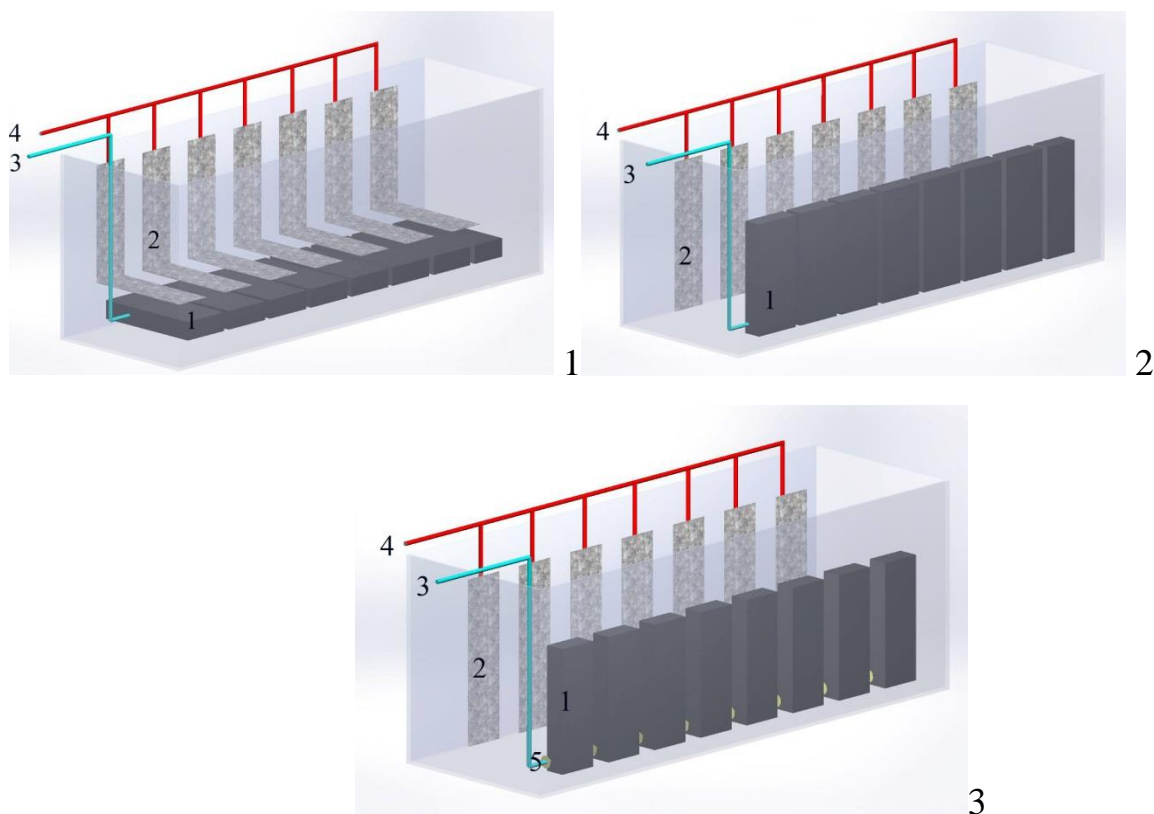
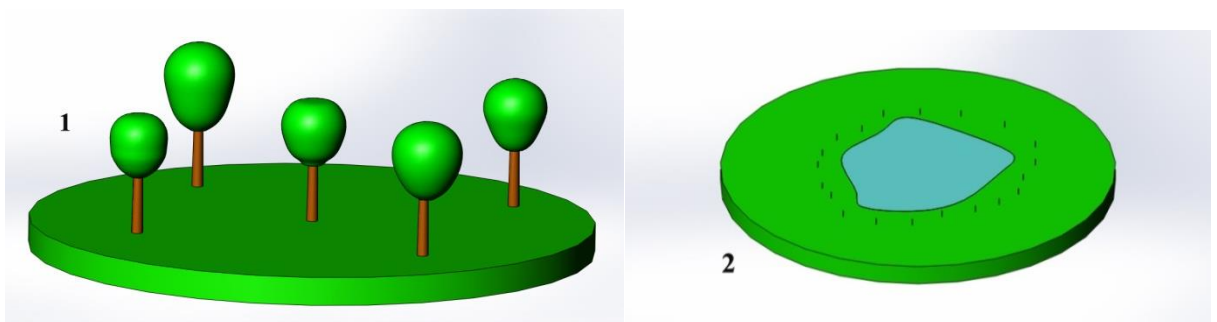


Рис.2.2.5 Конфігурації електродних систем (1–3) в біосистемах з осокою шершаволистою: 1 – катода, 2 – аноди, 3 – вихід дроту, що з'єднує систему катодів, 4 – вихід дроту, що з'єднує систему анодів, 5 – кріпильні елементи

Катодами служили графітові пластини, з'єднані між собою дротом майже в притул у вигляді плити (1 і 2) та на відстані один від одного, для збільшення площі контакту катодів з ґрунтом (3) (рис. 2.2.5). В біосистемі 1 катодні електродні системи розміщувалися в контейнерах горизонтально під анодами та корінням рослин, а в біосистемах 2 і 3 – вертикально, паралельно до анодів під корінням рослин (рис. 2.2.5). В біосистемі 3 з'єднання між катодами було додатково посиленим за допомогою нержавіючо-стальних кріпильних елементів (рис. 2.2.5).

2.3 Умови проведення експериментів в лабораторних умовах та *in situ*

Дослідження розділу 3 щодо вибору нових електродних матеріалів для біосистем проводилися як в лабораторії, так і *in situ* в лісових та садових екосистемах сіл Волощина Перемишлянського району Львівської області, Прилісне Маневицького району Волинської області протягом 10-ти днів у вересні 2013 року. Для визначення біоелектрики двоелектродні системи були погружені у ґрунт в 1-метровій зоні від стовбура деревних рослин та на відстані 0.15 м від основи стебла кімнатних рослин на глибину 0.05 м – 0.15 м з міжелектродною відстанню 0.10 м. Біоелектричні показники зразків досліджувалися із 3-кратною повторністю.



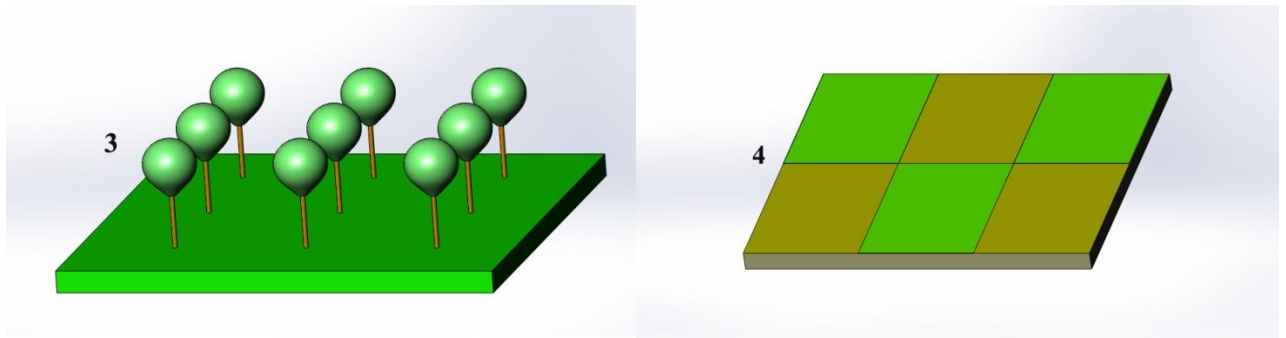


Рис. 2.3.1 Типи експериментальних ділянок моніторингу біоелектричних показників *in situ* в екосистемах: лісів (1), заболочених луків (2), фруктових садів (3) та агрокультур (4)

Двоелектродні системи в експериментах розділу 3 було також поміщено в область коріння висадженої в ґрунт рослини *Caltha palustris* L. Дослід повторювали з 10-ма біосистемами об'ємом 2 л. Для вивчення біоелектричних показників мультиелектродних систем їх розміщували на дні пластикового контейнера завдовжки 0.35 м із шириною 0.15 м та площею 0.0525 м² в області кореневої системи висаджених у ґрунт рослин калюжниці болотяної. Дослід виконувався з 10-кратною повторюваністю. Для дослідження впливу міжелектродної відстані та площі електродів, для конструювання біосистем з ряскою малою *L. minor* L. використовували прозорі пластикові контейнери діаметром 120 мм та висотою 120 мм. В контейнери поміщали електроди і середовище для розвитку рослин: 200 г піщаного субстрату, отриманого з дна ставка та 600 мл води із забрудненого ставка із додаванням свіжої водопровідної води по мірі випаровування води. Рослину ряску малу *L. minor*, отриману із забрудненого ставка неподалік м. Львова висаджували в кількості 60 листків/мл. Електроди повністю занурювали у водний субстрат в зону коріння рослин. Резистори під'єднували до дротів, виходячих з електродів та залишали підключеними на протязі 7 днів. Для розробки компактних біосистем з іншими ксерофітними та мезофітними видами рослин, використовували прямокутні пластикові контейнери з розмірами 120 (h) x 95 (w) x 60 (t) мм, як субстрат –

універсальний ґрунтовий субстрат Екофлора та насіння трави базилика кімнатного *Ocimum basilicum* в кількості 8 насінин на один контейнер, чи розсаду солейролії гелксини *Helcine soleirolii*. Об'єм використуваних контейнерів складав 0.7 та 0.6 л. Біосистеми отримували природнє освітлення та були розміщені безпосередньо біля вікон всередині будинку. Дослід виконувався з 10-кратною повторюваністю.

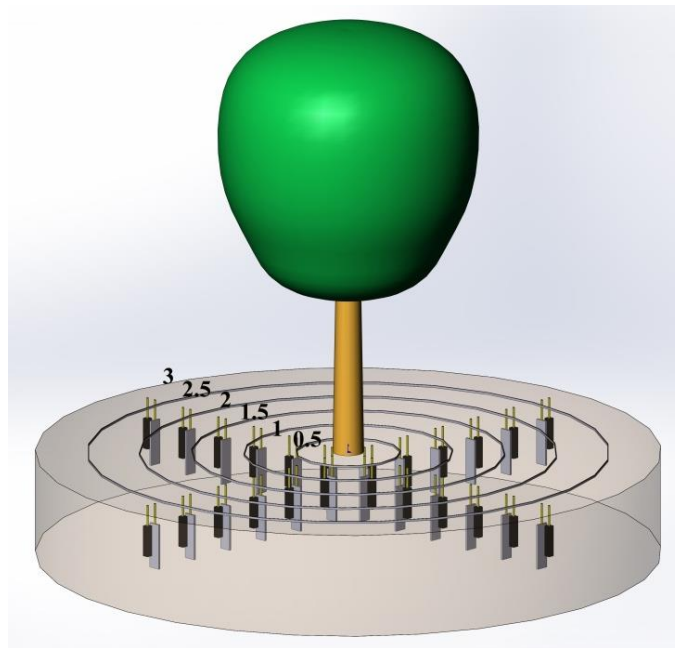


Рис. 2.3.2 Схематичне розташування розміщення електродів в товщі ґрунту довкола дерева в 4-ьох напрямках на відстані 0.5 – 3 м від стовбура дерева і на глибині 0.05 – 0.3 м в ґрунтовому горизонті, де зосереджена основна маса кореневої системи

В експериментах 4.1 вивчення біоелектричних параметрів проводилося *in situ* в екосистемах лісових масивів, заболочених луків, фруктових садів та насаджень агрокультур (рис. 2.3.1). Катоди та аноди поміщали з відстанню між електродами 0.10 м та на відстані 0.5 – 1.0 м від стовбура, 0.1– 0.3 м від стебла рослини і на глибині 0.05 – 0.3 м в товщі ґрунту, де зосереджена основна маса кореневої системи як лісових, так і польових рослин (Zinchenko et. al., 2001; Crow, 2005;

Eshel & Veeckman, 2013) (рис. 2.3.2). В частині експериментів 4.1 проводили заміри показників біоелектрики на відстані 0.5 – 3.0 м від дерева. Електроди залишали в ґрунті на весь час проведення експерименту. Покази біоелектрики реєстрували в чотирьох різних ділянках довкола одного дерева, оскільки кореневі системи можуть бути асиметричними (Ganatsas & Spanos, 2005) тричі на добу протягом 150-ти днів з червня по жовтень та обраховували їх середнє значення.

Експерименти 4.2 моніторингу біоелектрики проводилося *in situ* в паркових та лісопаркових зонах міста Львова із 3-ма типами ділянок: 1) з трав'яним покривом довкола дерев, 2) з інтенсивно розвинутим нижнім ярусом, паростками молодих дерев, трав'яним покривом та шаром опалого листя, довкола дерев, а також, 3) в паркових зонах з інтенсивним антропогенним навантаженням із бідним або і взагалі відсутнім рослинним покривом довкола внаслідок витоптування та ущільненим ґрунтом (рис. 2.3.3).

Електроди розміщували стаціонарно в ґрунті на протязі всього експерименту на відстані 0.5 – 3.0 м від стовбура дерева та глибині 0.05 – 0.3 м (рис. 2.3.2). Локалізація електродів у ґрунті обумовлена тим, що кореневі системи дерев в умовах міських парків в основній масі зосереджені, подібно як і у лісах, тобто, неглибоко, у горизонті до 0.3-0.4 м (Watson & Nelly, 1994). В цьому поверхневому шарі ґрунту зосереджено до 70 % всіх коренів клена гостролистого, берези бородавчатої, в'яза звичайного, до 80 % – у липи дрібнолистої і ясеня пухнастого (Day et al., 2010; Sultanova & Hanov, 2010; Moore, 2019). У горизонтальному напрямку у всіх деревних порід спостерігається зменшення числа коренів по мірі віддалення від стовбура дерева. Основна маса, до 88 % коренів у клена гостролистого, берези бородавчатої, в'яза звичайного, липи дрібнолистої локалізується на відстані до 1.2 м від стовбура дерева, у ясеня пухнастого – на відстані 1 м, хоча поодинокі горизонтальні корені можуть простягатися до 2 – 2.5 м у в'яза звичайного, берези бородавчатої, 3.5 – 4.5 м у клена гостролистого та липи дрібнолистої (Day et al., 2010; Moore, 2019). Електроди розміщували в чотирьох різних напрямках від стовбура дерева через можливу асиметричність корневих систем (Ganatsas & Spanos, 2005) (рис. 2.3.2). Покази біоелектрики

реєстрували щоденно протягом 150-ти днів з квітня по вересень та обраховували їх середнє значення.

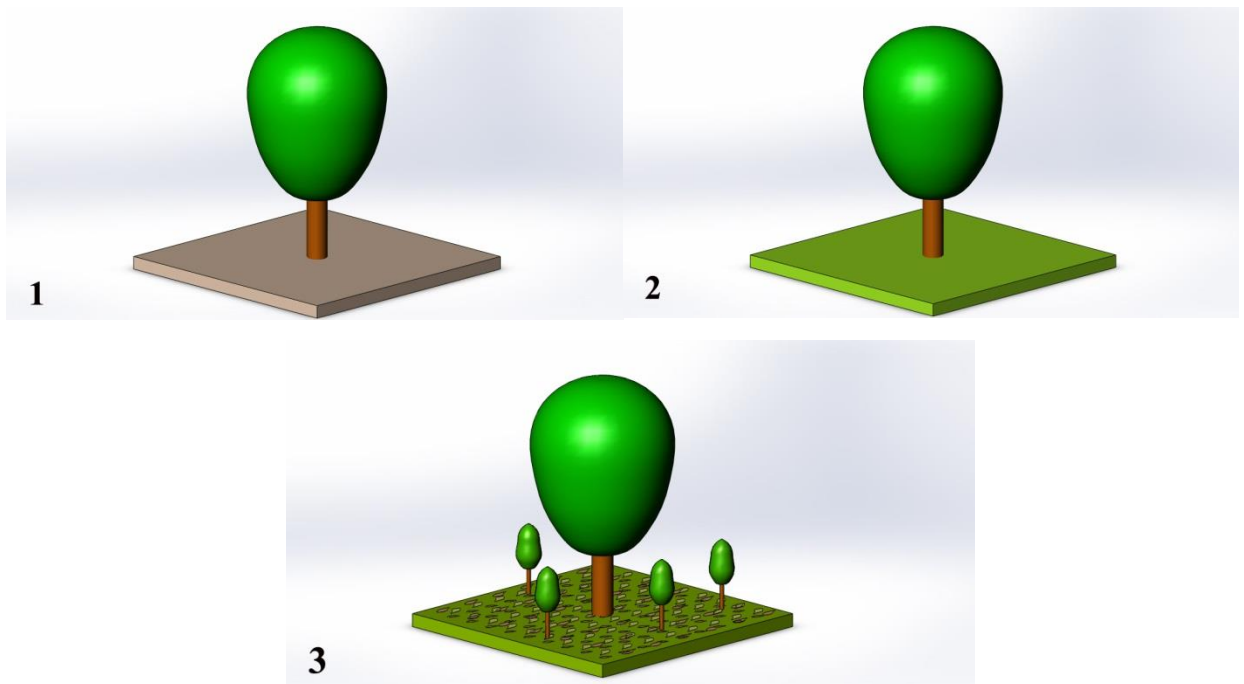


Рис. 2.3.3 Види експериментальних ділянок моніторингу біоелектричних показників в паркових та лісопаркових екосистемах: (1) ділянка з ущільненим ґрунтом та бідним або відсутнім рослинним покривом довкола дерева, (2) ділянка з розвинутим трав'яним покривом довкола дерева, (3) ділянка з інтенсивно розвинутим нижнім ярусом та молодими невеликими деревами

Для визначення біоелектропродуктивності техногенно забруднених територій в експериментах 4.3 електроди стаціонарно монтувалися на глибину 0.15 м у товщу ґрунту з періодичністю 2.5 м дослідної ділянки протяженістю 25 м. Було проаналізовано біоелектрику забруднених автомобільними викидами газонів розділяючих смуг вздовж міських автотрас із високим та середнім типом навантаження, а також у селах вздовж локальної автотраси, так і газони міст і сіл без будь якого впливу викидів автомобілів як контрольні, розташовані на віддалі від автотрас і техногенних джерел забруднення (рис.2.3.4).

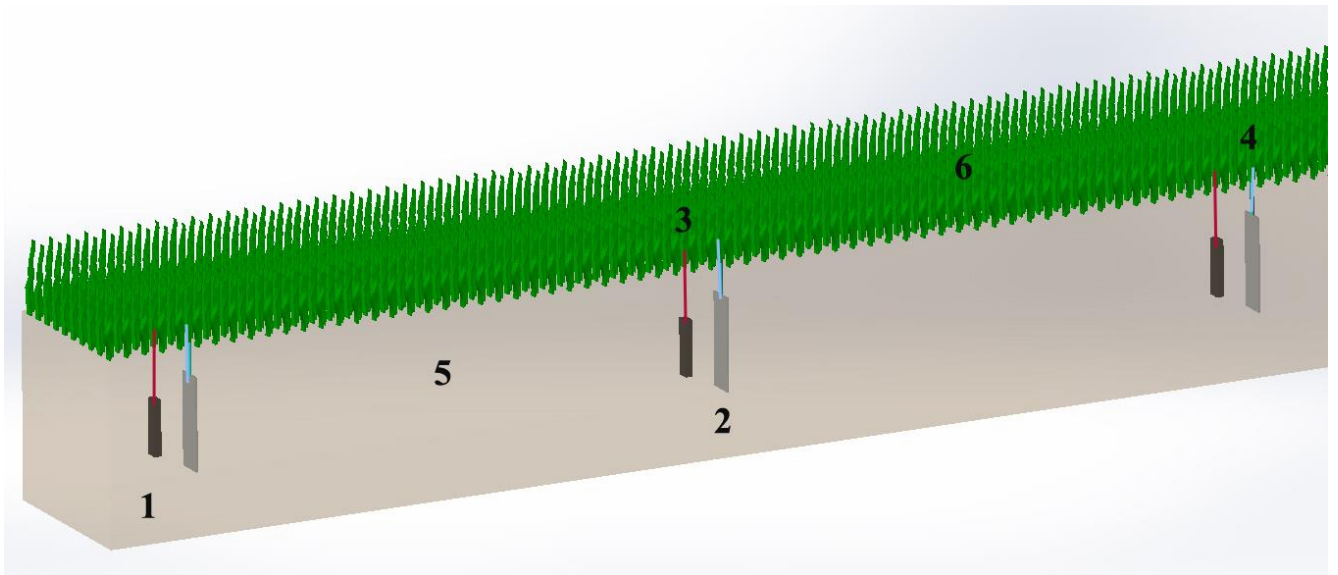


Рис. 2.3.4 Схема розміщення електродів в зоні взаємодії ризосферних мікроорганізмів та корневих систем трав газонів на розділяючих зелених смугах вздовж автотрас. Фрагмент дослідної ділянки з 3-ма парами електродів, кожна пара електродів розташована що 2.5 м та на глибині 0.15 м у ґрунті: 1 – катоди, 2 – аноди, 3 – дріт, що виходить від катодів на ґрунтову поверхню, 4 – дріт, що виходить від анодів на ґрунтову поверхню, 5 – ґрунт, 6 – трава.

Аналізувалися два типи забруднених ділянок: безпосередньо біля світлофору та пішохідного переходу, охоплюючи відстань 0 – 25 м біля них та вздовж траси на відстані 250 і 500 м від світлофору та зупинки автотранспорту (рис. 2.3.5). Тобто в першому випадку в місцях, де газон зазнавав найбільшого впливу автомобільного забруднення, адже, при старті спостерігаються найбільші викиди, оскільки автомобілі на цих ділянках траси постійно газують, зупиняючись та знову стартуючи, підїзджаючи до світлофору, та, рушаючи після зупинки перед світлофором. В другому випадку, аналізувалися біоелектричні параметри в зоні меншого впливу поллютантів, оскільки на цій ділянці автомобілі проїзджають не зупиняючись. Експеримент тривав протягом 70-ти днів на вулицях міста Львова: вулиця митрополита Андрея, проспект Чорновола, вулиця Хуторівка.

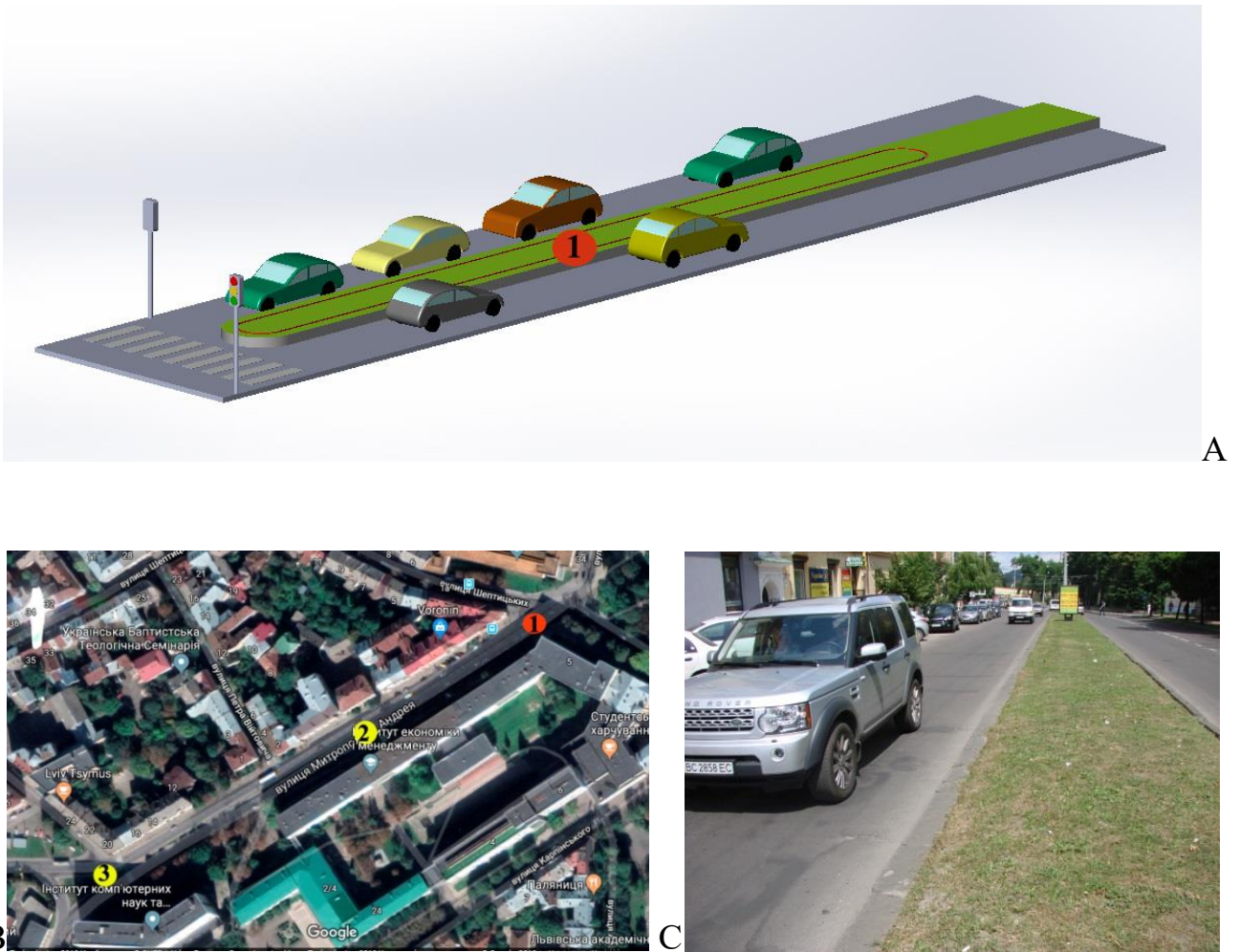


Рис. 2.3.5 Електродні системи монтували у ґрунт з фітомікробіоценозом зеленої смуги вздовж автотраси на вулиці митрополита Андрея міста Львова: (А) загальна схема дослідної ділянки, (В) її картографічний вид, (С) фотографія дослідної ділянки: 1 – локалізація електродних систем в зонах інтенсивного забруднення автовикладами 0 – 25 м від світлофора; 2, 3 – розміщення електродів у зоні помірного забруднення ґрунту 250 та 550 м від світлофору.

Для вивчення особливості генерації біоелектрики розробленими біосистемами всередині енергоефективних будинків експерименти розділу 5 були проведені в умовах приміщень. В сконструйованих електробіотехнологічних системах біологічними компонентами виступали рослини водного подорожника *A. plantago-aquatica*, природний біом ґрунтових електрогенеруючих мікроорганізмів та зовні додані сульфатредуючі бактерії, а технологічним компонентом – сконструйована нами електродна система, описана вище в 2.2, розміщена у

субстраті. Весною, найбільш оптимальним часом для пересадки водного подорожника (Grigoryev, 2006), з природних водойм були взято молоді екземпляри рослини, які ще не цвіли, з 2 – 3 невеликими листками, та висаджено по два куші в пластикові контейнери площею 0.0525 м² у болотистий субстрат із системою збору електрики. Зразки рослин були взяті з різних міських водойм: ставків та озер міста Львова без будь-якого застосування антибіотиків, щоб не порушувати сформованого у водоймі взаємозв'язку коренів рослин та електрико-генеруючих мікроорганізмів. Середовище для розвитку рослин складалось із мулу природної водойми або універсального ґрунтового субстрату Eсоflogа та води в пропорції 2:1. Субстрат Eсоflogа був наступного складу: верховий торф високої якості, дернова земля, очищений річковий пісок та азотні, фосфорні, калійні мінеральні добрива і мікроелементи, серед яких Fe, Mn, Cu, Zn. В частину контейнерів в процесі розвитку рослин, два рази, в 1-й та 2-й місяць культивування як біодобриво було додано 100 мл суспензії сіркобактерій *Desulfovibrio sp. Yav-6* (Moroz & Rusyn, 2012) з концентрацією 2.7 мг/мл для дослідження впливу сульфатредуючих бактерій на процес генерації біоелектрики.

Біосистеми з рослинами утримували всередині будинків в житлових приміщеннях в різних температурних умовах: 1) на неопалюваних балконах та терасах, де температура коливалась від +5°C у зимовий період до +26°C у літній, та 2) на опалюваних в зимовий період закритих терасах та балконах та безпосередньо у квартирах при температурі в середньому +21 ± 3°C протягом всього часу експерименту. Дослід проводився в реальних умовах, які існують в приміщеннях, чи то квартирах, чи офісах при двох різних температурних режимах, так як житловий фонд представлений двома типами закритих балконів та терас опалюваними та без опалення. Змінне змішане освітлення, включаючи природне освітлення денним світлом через вікна та штучні джерела світла, а також додаткове штучне освітлення в зимовий період для забезпечення тривалості світлового дня 12 годин було застосоване. Рослини поливали раз в 2 – 3 дні.

Експеримент тривав з 20-ма рослинно-мікробними біосистемами протягом року з моменту посадки рослин весною до наступного весняного періоду.

Щоб оцінити можливість та перспективи використання рослинно-мікробних біосистем, базованих на неболотистих рослинах, ґрунтовому субстраті з новою розробленою нами електродною системою в приміщеннях енергоефективних будинків незалежно від погодніх умов були проведені експерименти розділу 6. Розроблена біотехнологічна система складалася із біологічного та технічного компонентів: пластикового контейнера площею 0.0525 м² з універсальним ґрунтовим субстратом та сконструйованої нами електродної системи, описаної в розділі 2.2 (Rusyn & Medvediev, 2018). Електродна система була розміщена в товщі та на дні контейнера в зоні асоціації рослинного коріння та мікроорганізмів, де відбувається емісія електронів та протонів. Біологічними компонентами виступали природний біом ґрунтових мікроорганізмів, насіння костриці очеретяної *F. arundinacea*, а згодом, проросла трава.

Інсталяція біотехнологічної системи проходила наступним чином. На дно пластикового контейнера було засипано сантиметровий шар універсального ґрунтового субстрату Ecoflora, на дні і вздовж бокових стінок контейнера розміщено катодну та анодну систему, а тоді їх було вкрито універсальним ґрунтовим субстратом до країв контейнера, залишаючи вільними 3 см контейнера. Дроти від електродних систем виводили назовні з ґрунтової поверхні та під'єднували до мультиметра.

Насіння *F. arundinacea* в кількості 20 г на 1 м² засипали на ґрунтову поверхню, засипали сантиметровим шаром ґрунту і поливали. До моменту появи перших паростків над контейнером створювали мінітеплицю, розтягуючи тонку поліетиленову плівку між верхніми краями контейнера. В цей час біосистему розміщували подалі від світла. Після проростання насінин мінітеплицю знімали, а контейнер розміщували у світлому місці приміщення. Догляд за електробіотехнологічною системою полягав в поливі субстрату близько двох разів в тиждень по мірі висихання ґрунту. Контейнери витримували при температурі 22°C ± 2°C при природному сонячному освітленні з додатковим

побутовим освітленням квартири у вечірній час в пізньо-осінній, зимовий та ранньо-весняний період. Експеримент з 20-ма рослинно-мікробними біосистемами тривав протягом року. В експерименті розділу 6 насіння було висіяне у квітні, хоч закладати біосистему можна круглорічно, але найбільш ефективною буде інсталяція весною, літом та осінню.

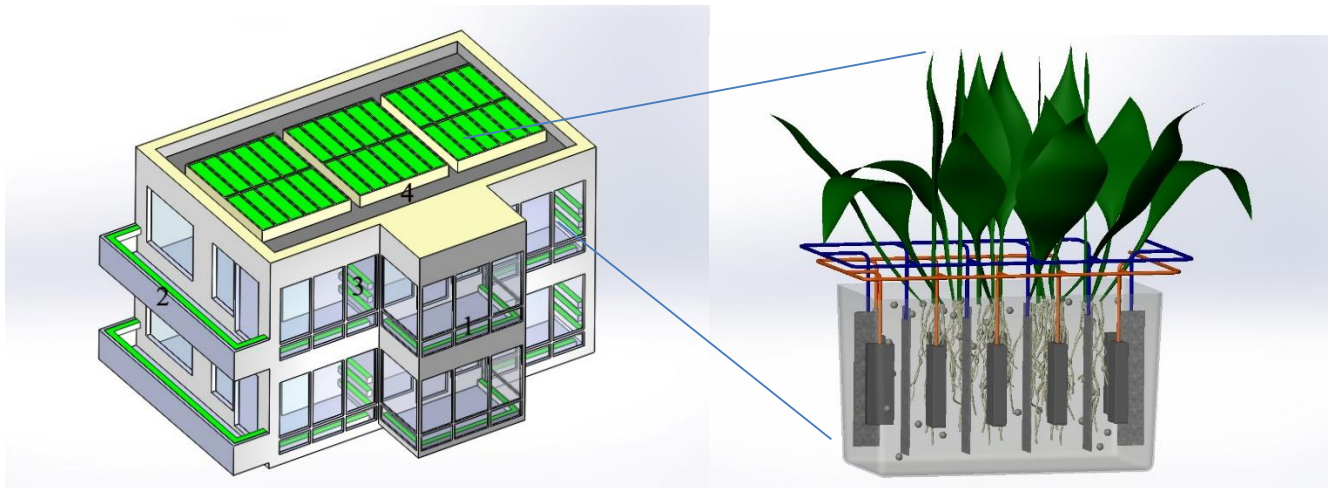


Рис. 2.3.6 Дослідження біосистем в енергоефективних будинках велояк всередині на зашкленних балконах (1) та кімнатах (3), так і зовні на відкритих балконах/терасах (2), а також на даху будинку (4)

Експерименти розділу 7 виконувалися в польових умовах в природному місцезростанні калюжниці болотяної на низовині Волинського Полісся в селі Кульчин Турійського району Волинської області та у високогірних умовах на висоті 1013 м над рівнем моря у селі Кривопілля Верховинського району Івано-Франківської області українських Карпат. Дослідні біотопи з кущами *S. palustris* мали різний ступінь освітлення від 800 до 2000 Люкс, вологість ґрунту коливалася від 80 до 100%, рН ґрунту становила 6 – 8, середня температура повітря складала від 14°C у високогір'ї до 25°C у Поліссі, а розмір самих кущів *S. palustris* становив від 0.15 до 0.55 м. Катоди в експериментах *in situ* були стаціонарно розміщені в ґрунті на глибині 0.15 м та 0.30 м, аноди були поміщені на глибину 0.30 м. Тривалість експерименту 100 днів протягом літа та початку вересня.

Щоб оцінити можливість використання *C. palustris* в якості біокомпонента в біотехнологічних системах на відкритих терасах та балконах будинків були проведені експерименти щодо особливостей генерації біоелектрики калюжниці болотяної в цих умовах. Пластикові вазони із ґрунтовим субстратом та висадженими рослинами *C. palustris* і електродами були розміщені на терасах та балконах багатоповерхових будинків, затінених вище розташованими терасами та балконами. Тобто рослини утримувалися в дещо інших умовах, ніж в природних місцезростаннях: хоч і при тій самій температурі навколишнього середовища, але при значно нижчій кількості природного освітлення, в середньому близько 300 – 500 Люкс через затінення верхніми терасами та балконами та в меншій кількості субстрату, в горщиках, на відміну від необмеженої кількості ґрунту *in situ*. Рослини були захищені від потрапляння дощової води, полив відбувався регулярно.

Рослини для висаджування на терасах та балконах будинків були привезені з розсадника рослин та безпосередньо з природних місць росту рослин з болотистих ділянок українського Полісся: сіл Кульчин і Селець Турійського району Волинської області та села Чорніводи Городоцького району Хмельницької області. В досліді використовувалися кущі *C. palustris*, висотою в середньому 0.30 м. Рослини висаджувалися у горщики діаметром 0.25 м та глибиною 0.32 м з універсальним ґрунтовим субстратом Ecoflora. На дно поліпропіленового горщика засипали сантиметровий шар ґрунтового субстрату, на який поміщали коріння рослини та на визначену глибину катода і анода, засипаючи їх субстратом до верху горщика, залишаючи вільними 1 см контейнера. Дроти від електродних систем виводили назовні з глибини субстрату на ґрунтову поверхню та під'єднували їх до мультиметра. Контейнери з рослинами та електродами розміщували на терасах та балконах будинків міста Львова. В ґрунт частини зразків з періодичністю що 3 тижні додавали викопані з ґрунту анеліди *L. terrestris* в кількості 3 особини на горщик. Догляд за рослинами полягав в поливі субстрату по мірі висихання ґрунту. Експеримент проводився

протягом 100 днів під час весни і літа 2014 року із 20-ма біосистемами з *S. palustris*.

Експерименти розділу 8 та 9 проводився на даху останнього поверху навчального корпусу Національного університету «Львівської політехніки» з метою моніторингу біоелектричних параметрів біосистем в цих умовах (рис. 2.3.6). Конструкція складалася з впритул розміщених окремих біотехнологічних контейнерів без термоізоляції. Для цього було використано контейнери площею 0.0525 м² кожний, із розробленими нами системами електродів 11-ти конфігурацій для збору біоелектрики, що описані вище в розділі 2.2. та в які були висаджені рослини. Мохові доріжки *H. cypressiforme* та *P. commune* і зелені подушки *L. glaucum* були привезені з карпатських лісів сіл Кам'янка Сколівського району Львівської області та села Кривопілля Верховинського району Івано-Франківської області, а також, екземпляри рослин осоки шершаволистої *S. hirta* з середнім розміром рослини біля 0.37 м були привезені з місць природного зростання села Селець Турійського району та села Прилісного Маневицького району Волинської області. Середовище для розвитку рослин складалося із універсального ґрунтового субстрату Ecoflora. 20-ть біосистемних контейнерів з осокою та 20-ма біосистемами з мохами утримувались на даху протягом року в режимі нерегулярного поливу.

2.4 Визначення показників біоелектрики та обрахунки.

Показники біоелектрики рослинно-мікробних біосистем моніторили як в умовах відкритого кола, так і при застосуванні зовнішніх резисторів протягом різного періоду часу в залежності від мети експерименту. За допомогою цифрового мультиметра UT890C UNIT-T, щупи якого закріплювалися на дротах, що виходили на поверхню з глибини субстрату від системи катодів та анодів, знімали покази постійної напруги (біоелектричного потенціалу (U)) та силу струму (I). Заміри біоелектричних параметрів проводилися щоденно та обраховували їх середні значення, в тому числі середньодобові, середньотижневі,

середньодвотижневі (експеримент 5, 8) і середньомісячні значення та середні за весь період експерименту. Щоб визначити при якому зовнішньому опорі можна отримати максимум потужності були проведені поляризаційні вимірювання використовуючи опори від 10 до 12 kΩ. Дослідження генерації біоелектрики зразків в умови короткочасного навантаження здійснювались із застосуванням зовнішніх резисторів 10, 50, 250, 500, 1000, 3000, 5000, 12000 Ω. Напруга фіксувалася через зовнішній резистор, що періодично і короткочасно, протягом 15 хвилин, був під'єднаний у коло. Поляризаційний аналіз проводився кілька разів для кожного зразка. Під час лабораторних експериментів також вимірювалася напруга, коли зовнішній резистор був тривало під'єднаний протягом кількох діб і кількох тижнів дослідження. Сила струму обраховувалася теоретично через практично виміряні напругу та опір, а також, вимірялася практично із застосуванням резисторів, а також визначали струм короткого замикання. Сила струму обраховувалася відповідно до формули (1), де

$$I (A) = U (V) / R (\Omega) \quad (1)$$

U – виміряний біоелектричний потенціал,

R – зовнішній опір.

Густина сили струму визначалася згідно формули (2), де

$$J (A/m^2) = I (A) / S (m^2) \quad (2)$$

I – сила струму,

S – площа експериментальної ділянки біосистеми, вкритої рослинами та електродами .

Густина потужності обраховувалася за формулою (3), де

$$P \text{ (Вт/м}^2\text{)} = J \text{ (А/м}^2\text{)} * U \text{ (В)} \quad (3)$$

Густина потужності була нормалізована до 1 м² експериментальної площі біосистеми, охопленої рослинами та електродами (plant growth area, PGA).

2.5 Моніторинг метеорологічних факторів та фізико-хімічних чинників довкілля

Вологість ґрунту, його рН та освітлення дослідної ділянки біотопу проводили за допомогою портативного ґрунтового 3-канального вологометра/рН метра/люксометра АМТ-100, щупи якого занурювали у ґрунт вертикально на глибину 0.20 м. Покази реєстрували в трьох точках дослідної ділянки та обраховували середнє значення.

Вологість ґрунту, W, позначали в % та вимірювали в діапазоні 0 – 100%: до 30 % – сухий ґрунт, 31 – 70 % – вологий ґрунт, 71 – 100% – мокрий ґрунт. Залежно від кількості вологи в субстраті, змінюється його електрична провідність. На основі цієї властивості базується робота кондуктометричних вологомірів. Два щупи приладу занурюють в досліджуваній субстрат, визначаючи опір між ними. Далі пристрій аналізує вологість за формулою і відображає результат на дисплей.

рН ґрунту вимірювали в діапазоні від 3.5 до 8 і позначали як: 3.5 – 6.5 – кисла реакція, 6.5 – 7.5 – нейтральна, 7.5 – 8 – лужна.

Освітлення ділянки, E, реєстрували в люксах, у діапазоні вимірювань 0 – 2000: і позначали, як 0 лк – відсутність освітлення, 2000 лк – максимальне освітлення. Принцип фотометричного визначення освітлення базується на явищі фотоелектричного ефекту. Світло при поданні на напівпровідниковий фотоелемент приладу внаслідок передачі своєї енергії приводить до вивільнення електронів напівпровідника, внаслідок чого утворюється струм. Величина сили струму пропорційна освітленості фотоелемента.

Розрахунок середньодобових та середньотижневих температур довкілля та кількості опадів здійснювався за допомогою обробки метеорологічних даних

архіву метеостанцій gr5.ua, було обчислено сумарну кількість опадів щотижня та середньодобову кількість опадів кожного тижня.

2.6 Відбір проб ґрунту для хімічного аналізу та визначення коефіцієнту концентрації

Для відбору проб ґрунту для хімічного аналізу використовували ножі з поліетилену, ґрунтові сита з отворами сітки 0.25, 0.5, 1 та 3 мм за GOST 6613-86, ваги лабораторні загального призначення за GOST 24104-2001 з граничним навантаженням 200 і 1000 г, бюкси емальовані, сушильну шафу, кристалізатори скляні, муфельну піч з нагрівом від 100 до 500°C, пакети поліетиленові, ступки і товкачі фарфорові за GOST 9147-80 (рис. 2.6.1).



Рис. 2.6.1 Зважування зразків (1) перед поміщенням у муфельну піч для висушування при 460°C (2)

Точкові ґрунтові проби відбирали ножем за GOST 17.4.4.02-84. Об'єднану ґрунтову пробу склали шляхом змішування 5 точкових проб по 200 г кожна, відібраних на одній пробній ділянці за GOST 17.4.4.02-84. Вага об'єднаної проби була не менше 1 кг. Точкові проби відбирали з глибини 0 – 0.05 м, оскільки поверхневі шари ґрунту 0 – 0.10 м і, особливо, 0 – 0.05 м, в більшій мірі, ніж глибокі відображають аерогенне техногенне забруднення ґрунту.

Проби ґрунту для аналізу висушували до сухого стану в два етапи.

1) Підсушені проби розсипали на папері і розминали товкачем великі грудки ґрунту, вибираючи включення: корені рослин, комах, скло, камінці тощо. Ґрунт розтирали в ступці товкачем і просіювали крізь сито з діаметром отворів 1 мм. Для визначення вмісту мінеральних компонентів з просіяної проби відбирали пробу вагою не більше 20 г і розтирали її в ступці до пудроподібного стану за GOST 17.4.4.02-84.

2) Проби ґрунту (10 г) поміщали в пронумеровані бюкси, заздалегідь висушені в сушильній шафі при температурі 105°C до сталої ваги, і ставили в нагріту муфельну піч (рис. 2.6.1). Ґрунт висушували до постійної маси при температурі 460°C на протязі 5 годин. Після кожного висушування ґрунт в бюксі охолоджували в кристалізаторі до температури приміщення і зважували. Висушування проводили до отримання різниці мас ґрунту з бюксом при двох наступних зважуваннях не більше 0.02 г. Для визначення коефіцієнту концентрацій визначали вагу сухого ґрунту, віднімаючи від маси бюкса з сухим ґрунтом масу порожнього бюкса. Коефіцієнт концентрації отримували, поділивши вагу вологого ґрунту на вагу сухого. Проби ґрунту для аналізу, висушені до сухого стану за GOST 5180-2015 зберігали у маркованих поліетиленових мішечках.

2.7 Рентгенофлюорисцентний аналіз складу ґрунту

Хімічний аналіз ґрунту проводили з метою визначення концентрацій важких металів у ґрунті для з'ясування їх впливу на біоелектричні параметри екосистем. Для проведення досліду використовували рентгенофлюорисцентний аналізатор хімічного складу елементів EXPERT 3L. Вміст елементів у ґрунті проводився за допомогою методу енергодисперсійного рентгенофлюорисцентного елементного аналізу зі збудженням випромінювання атомів проби фотонами рентгенівської трубки і реєстрацією цього випромінювання напівпровідниковим PIN-детектором аналізатора (рис. 2.7.1).

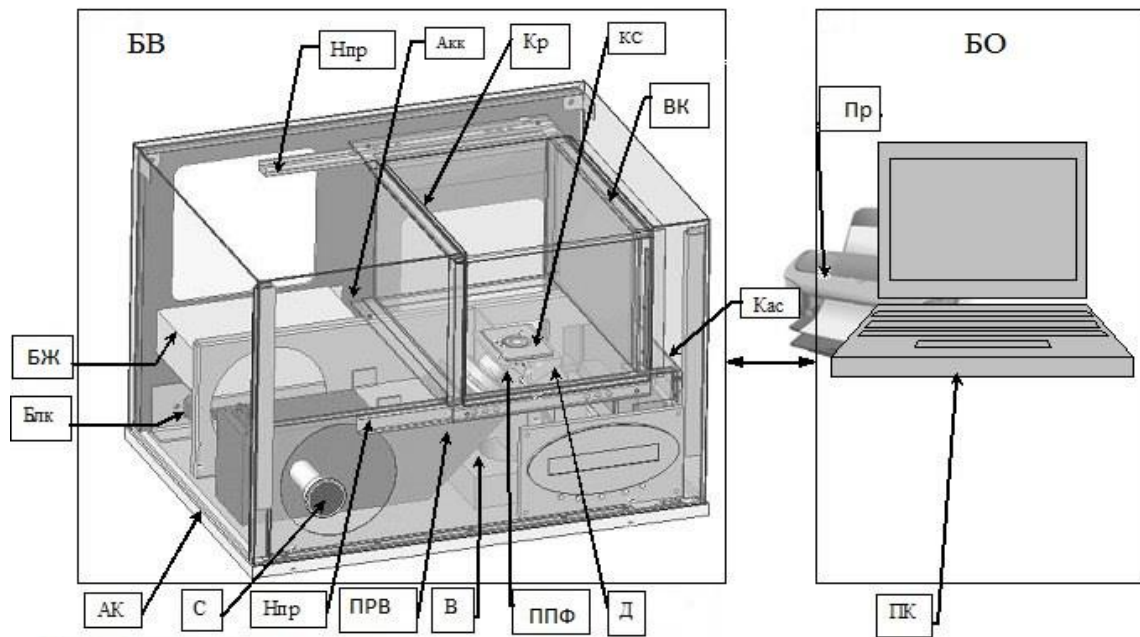


Рис. 2.7.1 Блок схема аналізатора EXPERT 3L, використовуваного для аналізу ґрунту: БВ – блок вимірювання, БО – блок обробки, АК– апаратний конструктив, С – кнопка включення живлення, ПРВ – прилад рентгенівського збудження, В – вентилятор, ППФ – прилад переключення фільтру, Д – рентгенівський детектор, Кас – касета з електронними модулями, ВК – вимірювальна камера, КС– колімаційна система, Кр – кришка вимірювальної камери, Акк – акумулятор резервного живлення, Нпр – направляючі кришки вимірювальної камери, БЖ – блок живлення, Блк – система блокування живлення, ПК– управляючий комп’ютер, Пр – принтер.

Кожен елемент дослідної проби має свій набір негативно заряджених електронів, які електростатично з’єднані з позитивно зарядженим ядром. Коли атоми збуджуються рентгенівським промінням, електрони, близькі до ядра вибиваються зі своїх орбіталей. Електрони з дальших орбіталей займають їх місце, вивільняючи при цьому фотони, що супроводжується явищем флуоресценції. Суть методу полягає в тому, що детектор аналізатора реєструє індивідуальний спектр флуоресценції кожного основного елемента. Енергія квантів в PIN-детекторі перетворюється в пропорційні по амплітуді електричні

сигнали, які поступають для обробки в аналізатор імпульсів. На основі спектрального аналізу, порівняння з еталонними зразками спектрів проводиться якісний і кількісний аналіз елементів у ґрунтовій пробі та визначаються їх масові долі в %.

2.8. Підготовка біодобрива на основі сульфатвідновлюючих бактерій

Сульфатредуючі сіркобактерії *Desulfovibrio sp. Yav-6* (Moroz & Rusyn, 2012) були виділені із Яворівського кар'єру Львівської області. Інокулят бактерій *Desulfovibrio sp. Yav-6* отримували в результаті культивування клітин в середовищі Кравцова-Сорокіна з сульфатами упродовж 10 діб у пробірках об'ємом 25 мл та колбах об'ємом 500 мл, доверху заповнених середовищем і щільно закритих гумовими корками при 30 °С.

Біомасу визначали за мутністю суспензії клітин шляхом її фотометрування на фотоелектроколориметрі КФК-3у кюветі з оптичним шляхом 3 мм і розраховували за формулою (1):

$$C \text{ (г/л)} = (E * n) / K, \quad (1)$$

де n – фактор розведення;

E – екстинкція при 340 нм;

K – коефіцієнт перерахунку, отриманий за калібрувальною кривою залежності екстинкції від маси сухих клітин, визначеної ваговим методом, рівний 0.19 для сульфатвідновлювальних сіркобактерій

В середовище розвитку рослин додавали біодобриво у вигляді 100 мл суспензії бактерій з концентрацією 2.7 мг/мл.

2.9 Визначення висоти і росту рослин та накопичення листяно-стеблової і кореневої маси рослин

Параметри рослин визначали біометрично та гравіметрично. Висота рослин визначалася біометрично шляхом вимірювання наземної частини рослини до верхівки рослини. Обчислювалися середні значення рослин на контейнер (експеримент розділу 5, 6). А також, ріст рослин вимірявся підрахунком та сумуванням біометрично виміряних довжин листя і стебел до отримання загальної довжини (Helder et al., 2010).

Для визначення сухої маси наземної частини та кореневої системи, стебла та листки відокремлювали від коріння. Коріння відмивали від ґрунту через систему сит з отворами 1.00, 0.50 та 0.25 мм. Рослинний матеріал був висушений при 80 °C та зважений. Накопичення листково-стеблової та кореневої маси на одиниці площі була обчислена як загальна суха маса на загальну площу, вкриту рослинами. Для кожного визначення використовували три зразки кожного виду, які були подрібнені до стану порошку.

2.10 Статистична обробка результатів

Зазначені в роботі результати є представлені як середнє значення для всіх повторюваних експериментів та їх стандартні похибки ($\bar{x} \pm SE$). Статистичну оцінку істотності різниці між середніми значеннями було обраховано за допомогою F-тесту для 95% рівня достовірності. Кореляцію між показниками обраховували за допомогою коефіцієнту Пірсона, яка вважалася значущою та високою при значенні більше 0.5.

Література до розділу 2

- Ashraf, M. & Harris, P. J. C. (2005). *Abiotic Stresses: Plant Resistance through Breeding and Molecular Approaches*. NH: The Haworth Press, Binghamton. doi.org/10.1017/S0014479706283790
- Bacon, C. W. (1993). Abiotic stress tolerances (moisture, nutrients) and photosynthesis in endophyte-infected tall fescue. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 44, 123-141.
- Bodnar, V. O. (2016). *Zahalna kharakterystyka lisiv ta lisovoho hospodarstva Ukrainy [General characteristics of forests and forestry of Ukraine]*. Publichnyi zvit Derzhavnoho ahentstva lisovykh resursiv Ukrainy, Kyiv (in Ukrainian), from <http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/archive/docview?typeId=177276>, http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=62921
- Crow, P. (2005). The influence of soils and species on tree root depth. Forestry Commission, Edinburgh.
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B. & Harris, J. R. (2010). Arboriculture & Urban Forestry. Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees, 36(4), 149–159.
- Denysyuk, N. (2018). Analiz stanu zelenykh nasadzhenn Parku molodi mista Rivne [The analysis of the state greenery of Molody Park in Rivne town]. *Naukovyi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky, Serii: Biologichni nauky*, 8 (381), 33–39 (in Ukrainian). doi.org/10.29038/2617-4723-2018-381-33-39
- Dzura, N. M., Moroz, O. M., Tsvilyniuk, O. M., Terek, O. I., Rusyn, I. B., & Romaniuk, O. I. (2008). Vidnovlennia naftozabrudnenoho gruntu za uchastiu roslyn *Carex hirta* [Reparation of oil-contaminated soil with the participation of plants *Carex hirta*]. Collection of scientific works of Uman State Agrarian University "Basis of Formation of Productivity Development of Agricultural Cultures for Intensive Growing Technologies", 197–203 (in Ukrainian).

- Elmi, A. A. & West, C. P. (1995). Endophyte infection effects on stomatal conductance, osmotic adjustment and drought recovery of tall fescue. *New Phytologist*, 131, 61–67.
- Eshel, A., & Beeckman, T. (2013). *Plant Roots: The Hidden Half*, Fourth Edition. CRC Press.
- Fedorovskyi, V. D., Terlyha, N. S., Yukhymenko, Yu. S., Danylchuk, O.V., Danylchuk, N. M., & Laptieva, O. V. (2013). Vydovyi sklad ta zhyttievyi stan derevno-chagarnykovoї roslynnosti parkiv ta skveriv m. Kryvyi Rih. [Specific composition and vital status of arboreal -bushes vegetation of parks and green squares Kryvyi Rih town]. *Introduktsiia roslyn* 3, 73–79 (in Ukrainian).
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124
- Ganatsas, P., & Spanos, I. (2005). Root system asymmetry of Mediterranean pines. *Plant and Soil*, 278,75–83. doi: 10.1007/978-1-4020-5593-5_12
- GOST 24104-2001 (2002). Mejsudarstvennyiy Standart. Vesyi laboratornyie. Obschie tehnicieskie trebovaniya [Interstate standard. Laboratory scales. General technical requirements]. Izdatelstvo standartov, Standartinform, Moskva (in Russian).
- GOST 17.4.4.02-84 (2006) . Mejsudarstvennyiy Standart. Ohrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza. [Interstate standard. Nature protection. Soils. Methods of selection and preparation of soils samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Izdatelstvo standartov, Standartinform, Moskva (in Russian).
- GOST 6613-83 (2006). Mejsudarstvennyiy Standart. Setki provolochnyie tkanyie s kvadratnyimi yacheykami. Tehnicieskie usloviya [Square meshed woven wire

- cloths. Specifications]. Izdatelstvo standartov, Standartinform, Moskva (in Russian).
- GOST 9147-80 (2011). Mejosudarstvennyiy Standart. Posuda i oborudovanie laboratornyie farforovyye. Tehnicheskie usloviya [Interstate standard. Laboratory porcelain ware and apparatus. Specifications]. Izdatelstvo standartov, Standartinform, Moskva (in Russian).
- GOST 5180-2015 (2015). Mejosudarstvennyiy standart. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh harakteristik [Interstate standard. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics]. Izdatelstvo standartov, Standartinform, Moskva (in Russian).
- Grigoryev, D. (2006). Botanika. Entsiklopediya "Vse rasteniya mira" [Botany Encyclopedia. All plants of the world: The translation from English]. Konemann, Verlagsgesellschaft (in Russian).
- Gubanov, I. A., Kiseleva, K. V., Novikov, V. S., & Tihomirov, V. N. (2002). *Carex hirta* L. – Osoka mokhnataya ili korotkovolosistaya [*Carex hirta* L. – The sedge shaggy or short-haired]. Illustrated determinant of plants of Central Russia. In: 3 volumes. V.1. Ferns, horsetails, plauns, gymnosperms, angiosperms (monocots). Community of scientific publications, KMK, Institute of Technology researches, Moscow (in Russian).
- Ivanchenko, O. Ie., & Bessonova, V. P. (2015). Analiz dendroflory nasadzen Molodizhnoho parku mista Dnipropetrovsk [Analysis of dendroflora of greenery of Dnepropetrovsk Youth Park]. *Biologiya ta ekologiya*, 1(20), 20–32 (in Ukrainian).
- Jermy, A. C., Simpson, D. A., Foley, M. J. Y., & Porter, M. S. (2007). Sedges of the British Isles. BSBI Handbook No. 1. Third edition. Botanical Society of the British Isles, London.
- Moore, G. M. (2019). Managing Urban Tree Root Systems. Proceedings of the 20th National Street Tree Symposium, 1-10. University of Adelaide's Waite Arboretum.
- Moroz, O. M., & Rusyn, I. B. (2012). Vykorystannia spoluk nitrohenu bakteriiamy tsyklu sulfuru ozera Yavorivske. [The use of nitrogen compounds by bacteria of

- the sulphur cycle of a lake Yavoriv]. *Mikrobiologiya i Biotekhnologiya*, 2(18), 96–109. (in Ukrainian)
- Osobennosti rosta kornevoy sistemy derevev v usloviyah goroda. [Features of growth of root system of trees in city conditions]. from <http://grmetod.ru/content/view/15/21/1/3/>, (in Russian).
- Rusyn, I. B., Figurka, O. M., Figurka, U. M., Dzhura, N. M., Moroz, O. M., & Novikov, V. P. (2009). Mikrobiota naftozabrudnenoho gruntu, rekultyvovanoho roslynamy *Carex hirta* [Microorganisms of oil polluted soils recultivated by *Carex hirta*]. *Mikrobiologia i Biotechnologia*, 8, 41–47. (in Ukrainian)
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2015) Sposib priamoho otrymannia bioelektryky z gruntu [The method of obtaining bioelectricity from the ground]. Patent of Ukraine 98393, filed November 17, 2014, issued April 27, 2015 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2016). Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybyunnykh shariv gruntu [Biological method of producing bioelectricity from deep soil layers]. Patent of Ukraine 112093, filed March 9, 2016, issued December 12, 2016 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymannia bioelektryky iz konteynera z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodov [The method for bioelectricity obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).
- Sultanova, R. R. & Hanov, D. A. (2010). Osobennosti rosta lipy melkolistnoy v usloviyah gorodskoy sredy. [Peculiarities of growth of small-leaved linden in urban environment]. *Vestnik Bashkirskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 1, 52–57 (in Russian).
- Tsvelev, N. N. (1979). Rod Chastuha – *Alisma L.* [Genus *Alisma L.*]. In Fyodorov A. A., Gusev, Y. D. (Eds.). Flora evropeyskoy chasti SSSR [Flora of the European part of the USSR], Vol 4, 158–162, Nauka, Leningrad (in Russian).
- Tsvelev, N. N. (1981). Semeystvo chastukhovyye (Alismataceae) [Family Alismataceae]. In Takhtadzhyan, A. L. (Eds.) Zhizn rasteniy [Plant life], Vol. 6, Tsvetkovyye rasteniya, 12–17. Prosveshcheniye, Moskva (in Russian).

- Zinchenko, O. I., Salatenko, V. N., & Bilonozhko, M. A. (2001). Roslynnnytstvo. [Plant Growing]. Ahrarna osvita, Kyiv (in Ukrainian).
- Wang, A.-J., Liang, B., Li, Z.-L., & Cheng, H.-Y. (2018). *Bioelectrochemistry stimulated environmental remediation. From Bioelectrorespiration to Bioelectrodegradation*. Verlag, Springer, Singapore.
- Watson, G. W. & Neely, D. (1994). *The Landscape Below Ground*. International Society of Arboriculture, Illinois.

Розділ 3. Розробка структури біомодулів для отримання рослинно-мікробної біоелектрики

В пошуках екологічно чистих джерел енергії людина стала освоювати енергію сонця, вітру, води, а також, ресурси мікроорганізмів, використовуючи, як продукти їх метаболізму біогаз (Allen, 2015; Sawyerr et al., 2019), так і безпосередньо біоелектрику (Potter, 1911), яку вони генерують, розвиваючись на поживних середовищах та відходах, створюючи мікробні паливні елементи, MFC та рослинно-мікробні паливні елементи, PMFC (Strik et al., 2008), утилізуючи органічні рослинні продукти фотосинтезу (De Schamphelair et al. 2008; Kaku et al. 2008; Strik et al., 2008) чи продукти рослинного опаду (Timmers et al., 2012; Dai et al., 2015).

Електропродуктивність біотехнологічних систем для отримання рослинно-мікробної біоелектрики (PMFC) залежить від множини факторів: електродних матеріалів і їх конфігурацій, типу рослин і електрогенезу мікроорганізмів, субстрату, температури, вологості середовища та освітлення (Timmers et al., 2012; Behera & Varma, 2016; Nitisoravut & Regmi, 2017). Вибір оптимальної електродної пари для біоелектротехнології є вагомим фактором, на якому фокусуються науковці всього світу.

Як електродні матеріали в електробіосистемах найбільш поширеними є вуглець базовані пари електродів. Вуглецеві катоди та аноди використовувались ще у перших PMFC дослідженнях (Strik et al., 2008), вуглець базовані електроди є основою і сучасних рослинно-мікробних біосистем через 12 років поспіль (Gomora-Hernandez et al., 2020). Види електродних вуглецевих матеріалів і їх комбінації є дуже різноманітними: гранули, палички, тканини, волокна, диски. Електродну пару графітові гранули/графітова тканина запропонували для створення PMFC група науковців Strik et al. в 2008, та продовжували вивчати у подальших експериментах (Timmers et al., 2010; Timmers et al., 2012; Arends et al., 2014). Дещо відмінні пари електродів: графітові палички в графітових гранулах/графітова тканина та графітові гранули/карбонова тканина були в

дослідженнях (Helder et al., 2010; Habibul et al., 2016). Графітові палички/графітові гранули чи графітові палички/графітові волокна як електроди розробили (Cervantes-Alcala et al., 2012; Dai et al., 2015). Пари однакових електродів графітовий диск/графітовий диск і графітова плита/графітова плита були підібрані у експериментах (Venkata Mohan et al., 2011; Chiranjeevi et al., 2012). Графітовий диск/карбонова тканина були представлені в роботах (Lu et al., 2015).

Багато PMFC досліджень використовували як електродні пари лише графітові чи вуглецеві тканини: графітова тканина/графітова тканина (Takanezawa et al., 2010; Helder et al., 2012; Timmers et al., 2013; Klaisongkram & Nolasut, 2014; Yan et al., 2015; Yan et al., 2018;), графітова мультишарова тканина /графітова моношарова тканина (Wetser et al., 2015), карбонова тканина/пориста карбонова тканина (Oon et al., 2015) або лише карбонові волокна/карбонові волокна (Moqsud et al., 2015; Sarma & Mohanty, 2018) чи карбоновий папір та карбонові волокна (Vombelli et al., 2016). Карбонові гранули/карбонова тканина, графітова тканина/карбон в оболонці політетрафторетилену, карбонова волокниста тканина/гранульоване активоване вугілля були розроблені для PMFC (Hubenova & Mitov, 2012; Kouzuma et al., 2013; Tapia et al., 2018).

Лише в кількох роботах досліджені інші неуглецеві матеріали: карбонові волокна/нержавіюча сталь (Vombelli et al., 2013), гранульоване активоване вугілля/нержавіюча сталь з вугіллям (Liu et al., 2013), мідна спіраль/цинкова сітка (de la Rosa et al., 2019), гранульоване активоване вугілля/платиною вкритий карбоновий катод (Ooadly et al., 2019).

Проте середня густина потужності біосистем з використанням вуглецевих електродів з різними типами рослин і субстратів є невисока та становить 3.5 – 440 mW/m² (Nitorisavut & Regmi, 2017), при цьому вартість використовуваних матеріалів як електродів для реєстрації показників біоелектрики, так і покриття дротів для з'єднання електродів нерідко є досить високою, зокрема, вартість електродів з гранульованого активованого карбону, золотих дротів та тефлоном вкритих мідних дротів (Helder et al., 2013a; Behera & Varma, 2016).

Використання в PMFC комбінації вуглецевих і невуглецевих електродних матеріалів за результатами електропродуктивності не поступаються чисто вуглецевим електродам, в тому числі, показане практичне застосування PMFC з мідно-цинковою парою електродів для енергоживлення приладів з низьким енергетичним споживанням (de la Rosa et al., 2019), тому вивчення нових електродних матеріалів представляє значний інтерес. Для збільшення ефективності PMFC технології необхідним є пошук нових електродних матеріалів серед матеріалів невисокої вартості, що може мати істотний вплив на отримувані показники біоелектрики та широке їх впровадження (Rabaey & Verstraete, 2005; Cheng et al., 2006).

Ще одним важливим фактором для підвищення генерації біоелектрики може бути створення мультиелектродних систем та їх послідовне і паралельне підключення. На MFC показано, що збільшення кількості електродів та підключення в стеки приводили до зростання генерації мікробної біоелектрики, проте вчені стикалися з проблемами втрати і реверсії напруги (Ren et al., 2012; Jung & Pandit, 2019). Даний процес є недостатньо вивченим у PMFC.

В зв'язку з цим, метою цієї роботи було долучитися до розв'язання основних проблем біосистем для отримання рослинно-мікробної біоелектрики: високої вартості матеріалів компонентів і низької ефективності отримання ними біоелектрики. Завданнями роботи була розробка біосистем з нових ефективних та малокоштовних електродних матеріалів, дослідження різних типів їх підключення та створення мультиелектродних біосистем. Ми поставили перед собою завдання перевірити можливість використання в якості катодів графітових відходів тролейбусного транспорту, що використовує графітові струмоприймачі для тролейбусних щіток, що може значно здешевити технологію. А також, дослідити здатість збору біоелектрики з рослинно-мікробних асоціацій парами електродів графіт/алюміній, графіт/оцинкована сталь, графіт/мідь, графіт/сталь, алюміній/мідь, алюміній/оцинкована сталь та мідними дротами з полівінілхлоридною ізоляцією, що є малодослідженими в якості компонентів електро-біосистем з метою вибору найбільш оптимальної пари електродів. Нашим

завданням було також сконструювати мультиелектродні біосистеми та порівняти їх електропродуктивність з двоелектродними, а також, з'ясувати роль послідовного та паралельного підключення РМФС біосистем у генерації біоелектрики.

3.1 Дослідження різних матеріалів як електродів для отримання рослинно-мікробної біоелектрики.

Для вибору нових матеріалів як електродів нами був проаналізований біоелектричний потенціал рослинно-мікробних ценозів різних видів лісових, садових, кімнатних рослин при використанні наступних пар електродів: графіт/алюміній, графіт/мідь, графіт/нержавіюча сталь, графіт/оцинкована сталь, алюміній/мідь, алюміній/оцинкована сталь, як в лабораторних умовах, так і в природних умовах. Було проаналізовано напругу 25-ти біосистем, на основі кімнатних рослин *H. helix* L., *C. elegans*, *S. lanceifolium*, *C. nobilis*, *V. miniata*, *C. ovata*, *D. seguine*, садових *V. vinifera*, *P. cerasus*, *P. domestica.*, *M. domestic*, *P. communis*, *J. regia*, *V. opulus*, *R. nigrum*, *R. idaeus*, *Ribes uva-crispa*, *R. rubrum*, та лісових *P. silvestris*, *Q. robur*, *F. sylvatica*, *C. betulus*, *B. pendula*, *B. pubescens*, *A. glutinosa*.

Найвищі показники біоелектрики у того самого зразку при використанні 6 різних пар електродів, було отримано при використанні пар електродів: графіт/алюміній та графіт/оцинкована сталь (рис. 3.1.1). Напруга, зареєстрована парами електродів графіт/алюміній та графіт/оцинкована сталь всередньому перевищував 1 В та відрізнялася незначно ($p > 0.079$) між цими парами електродів. Напруга рослинно-мікробних асоціацій коливалася в межах 0.8 – 1.3 В, в залежності від ступеню активності ґрунтових електрико-продукуючих мікроорганізмів. Середній біоелектричний потенціал, що фіксувався іншими парами електродів: алюміній/мідь, графіт/нержавіюча сталь та алюміній/оцинкована сталь в середньому становив 0.5 – 0.8 В.

Отже, напруга, зафіксована графітово-алюмінієвими та графітово-оцинковано парами електродів сталними суттєво перевищував показники, отримвані іншими парами електродів ($P < 0.05$), і в той же час, напруга зафіксована графітово-алюмінієвими та графітово-оцинковано сталними електродами статистично відрізнялася несуттєво.

Отримані нами середні значення напруги 1109 мВ при використанні графітово-алюмінієвих та графітово-оцинковано сталних електродів були на рівні, зафіксованому в інших біоелектричних системах з відмінними електродними системами і рослинами та подібним ґрунтовим субстратом. Так, 1000 мВ було отримано в PMFC на основі електродної системи з мідної спіралі/цинкової сітки із рослиною *Sansevieria asparagaceae* (Ayala-Ruiz et al. 2019), а також 1211 мВ в *Chlorophytum*-PMFC з графітовими електродами (Tou et al. 2019).

Високі значення напруги, що перевищує 1 В, виміряні парами електродів графіт / алюміній та графіт / оцинкована сталь показали їх перспективи як електродних матеріалів для проектування нового типу електродних систем. Цинкова сітка, дещо подібний матеріал, до використаного нами, був успішно використаний як електрод в *Cordyline fruticosa*-PMFC, забезпечуючий автономне живленні IoT застосувань (de la Rosa et al., 2019) та в PMFC для живлення бездротового сенсорного вузла для додатків смарт-міст (Ayala-Ruiz et al. 2019). Модифікація поверхні електродів на основі сталі показала ефективну стратегію підвищення ефективності роботи MFC (Kalathil et al., 2017; Liang et al., 2017). Оцинкована поверхня сталі захищає електрод від корозії, а електрод на його основі відносно недорогий. Поєднання високої електропровідності та корозійної стійкості сприяє використанню алюмінію в якості електродного матеріалу (Reboul & Varoux 2011), але він характеризується трохи вищою вартістю порівняно з оцинкованою сталлю (Ndjebayi, 2017).

Графіт є традиційним карбон-базованим матеріалом у рослинно-мікробній електробіотехнології, проте використання графітових паличок, відходів тролейбусного електротранспорту, є новизною цієї роботи та дозволяє здешевити

електробіотехнолою. Тому для подальших досліджень нами була обрана пара електродів графіт/оцинкована сталь (Rusyn & Medvediev, 2015) як електроефективна, стійка у зовнішньому середовищі та більш бюджетна. Середній вихід струму двоелектродної PMFC, базованій на графіт/оцинкована сталь електродах становить 4.06 мА, що є близьким до виходу струму *Agarantus africanus*-PMFC, що працює з ґрунтом та електродами на основі вуглецьволокнистого текстилю, що дорівнював 4.43 мА (Gomora-Hernandez et al., 2020).

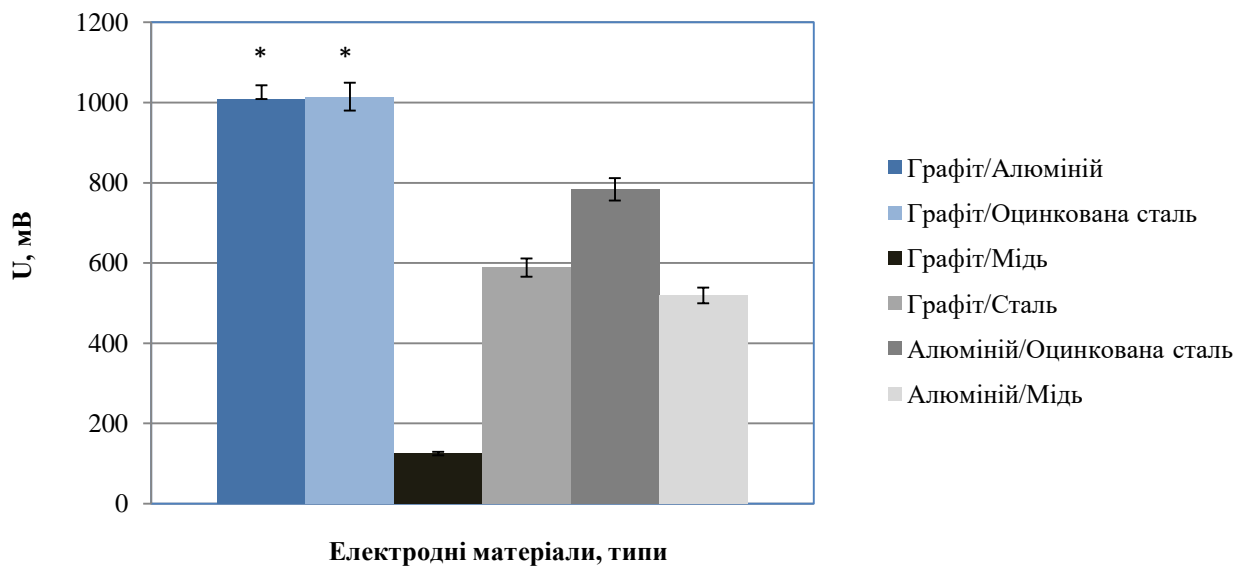


Рис. 3.1.1 Напруга біосистем, що генерувалася в залежності від матеріалів електродів
($x \pm SE$, $n=10$)

* Напруга, зареєстрована парами електродів графіт-оцинкована сталь та графіт-алюміній суттєво перевищувала показники, отримувані іншими парами електродів ($P < 0.05$).

Принцип запропонованого нами способу прямого отримання біоелектрики з ґрунту полягає у введенні в ґрунт (1) пари електродів: катоду (2) та аноду (3), які

з'єднані зовнішнім електричним ланцюгом, що містить споживач енергії (4) (рис. 3.1.2).

Ґрунтові мікроорганізми в процесі метаболізму виділяють назовні протони й електрони. Електрони і протони, вироблені електро-активними мікроорганізмами поступають на анод і катод, відповідно, подальший транспорт електронів до катоду створює електричний струм. Система електродів знімає постійний електричний струм. Включивши в зовнішній ланцюг адаптер можна перетворити його на змінний електричний струм. Розмістивши у ґрунті, в якому розвиваються рослини систему, що складається з дешевих та високоефективних електродів можна збирати біоелектрику, що її продукують ґрунтові мікроорганізми під впливом рослин, що розвиваються в даному ґрунті.

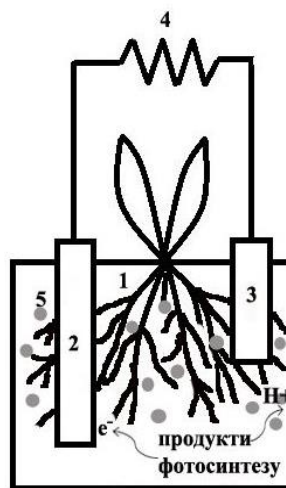


Рис. 3.1.2 Схема поверхневого розміщення пари електродів в біосистемі в ґрунті:
 1 – ґрунт з ростучою рослиною, що через кореневу систему виділяє субстрат для підтримки розвитку електроактивних мікроорганізмів;
 2 – анод і 3 – катод, рух заряджених частинок між якими створює електричний струм; 4 – зовнішній електричний ланцюг, що містить споживач енергії;
 5 – електроактивні ґрунтові мікроорганізми, які виділяють електрони та протони

Технологічна схема електродів для збору біоелектрики у ґрунті потребує під'єднання дротів. Найбільш мікробіологічно активним є ґрунтовий профіль 0 – 40см, де зосереджена основна маса рослинного коріння (Zinchenko et. al., 2001; Crow, 2005; Eshel & Veeskman, 2013), що живить електроактивні мікроорганізми. Висока вартість тефлоном вкритих мідних дротів, золотих дротів, використовуваних в PMFC технології, формують необхідність пошуку більш бюджетних варіантів провідників у електродних системах. Тому ми поставили перед собою завдання розробити отримання біоелектрики з глибинних шарів ґрунту економічним незатратним способом без зниження ефективності збору біоелектрики.

3.2 Полівінілхлорид-ізолювані мідні дроти у біосистемах

Під'єднання полівінілхлорид-ізолюваних мідних дротів до пари електродів, яку поміщаються глибоко в ґрунт, де розвиваються рослини, представляють можливість відбору біоелектрики ґрунту з глибинних шарів за допомогою економічно малозатратного способу (Rusyn & Medvediev, 2016). Такі катоди та аноди із закріпленими до них дротами можна використовувати глибоко у ґрунті, безпосередньо в зоні асоціації рослинного коріння та мікроорганізмів, де відбувається вивільнення електронів та протонів (рис. 3.2.1).

Проведені експерименти показали, що під'єднання ізолюваного мідного дроту не погіршує властивостей електродів (табл. 3.2.2, 3.3.3). Напругу та силу струму короткого замикання фіксували у тих самих зразках через дріт та безпосередньо через катоди та аноди. Було виявлено, що біоелектричні параметри біосистем, що зафіксовані через дріт та безпосереднього через електроди суттєво не відрізняються (табл. 3.2.2, 3.3.3). Напруга та струм коливалися в межах статистичної похибки в обох випадках вимірювання.

Різниця між показниками напруги, отриманими двома способами була незначною ($p > 0.079$) (табл. 3.2.2), як і різниця між струмом короткого замикання

біосистем. Сила струму як через під'єднаний до електродів дріт, так і безпосередньо через електроди, відрізняється незначно ($p > 0.156$) (табл. 3.2.3).

Табл. 3.2.2 Напруга біосистем, зареєстрована двома способами: через під'єднаний дріт та безпосередньо через електроди, статистично не відрізняється ($p > 0.079$) ($\bar{x} \pm SE, n=20$)

№ зразка	Напруга (мВ), виміряна через	
	дроти, під'єднані до електродів	безпосередньо через електроди
1	1075.1±23.5	1075.8±31.9
2	1087.3±24.9	1086.5±25.2
3	1019.2±39.6	1020.4±32.5
4	1180.7±32.5	1178.2±27.4
5	970.5±34.5	969.3±26.3
6	980.4±29.8	981.5±23.5
7	1217.3±25.4	1213.4±37.2
8	1195.4±41.7	1197.4±35.4
9	1050.1±28.6	1049.9±38.2
10	1089.6±39.7	1089±22.8
11	1055.9±23.8	1053.2±22.0
12	1038.4±24.3	1035.7±33.1
13	975.8±30.9	974.6±38.8
14	1220.7±29.7	1199.1±34.6
15	1121.9±25.6	1123.7±25.7
16	1205.5±28.5	1205.9±28.3
17	1030.2±35.8	1031±24.7
18	1074.6±38.7	1075.3±30.5
19	1200.1±31.6	1201.8±27.6
20	1104.2±28.4	1103.1±32.7

За допомогою запропонованих електродів з мідними дротами полівінілхлоридною ізоляцією можна реєструвати напругу та силу струму на довільній глибині у ґрунті.

Табл. 3.2.3 Сила струму короткого замикання біосистем, зареєстрована двома способами: через під'єднаний дріт та безпосередньо через електроди, статистично не відрізняється ($p > 0.156$) ($x \pm SE, n=20$)

№ зразка	Сила струму (мА), виміряна через	
	дроти, під'єднані до електродів	безпосередньо через електроди
1	4.7±0.12	4.7±0.09
2	5.4±0.17	5.3±0.14
3	4.6±0.15	4.6±0.11
4	3.5±0.10	3.4±0.12
5	4.6±0.09	4.6±0.10
6	5.2±0.15	5.1±0.13
7	4.8±0.14	4.7±0.12
8	5.0±0.16	4.9±0.14
9	3.3±0.12	3.2±0.11
10	4.4±0.14	4.4±0.15
11	4.7±0.11	4.7±0.13
12	5.0±0.09	5.0±0.15
13	3.4±0.10	3.4±0.12
14	3.8±0.13	3.7±0.14
15	5.1±0.12	5.1±0.15
16	4.5±0.11	4.5±0.12
17	5.4±0.17	5.4±0.18
18	3.7±0.08	3.7±0.12
19	4.0±0.09	4.1±0.08
20	3.8±0.12	3.8±0.11

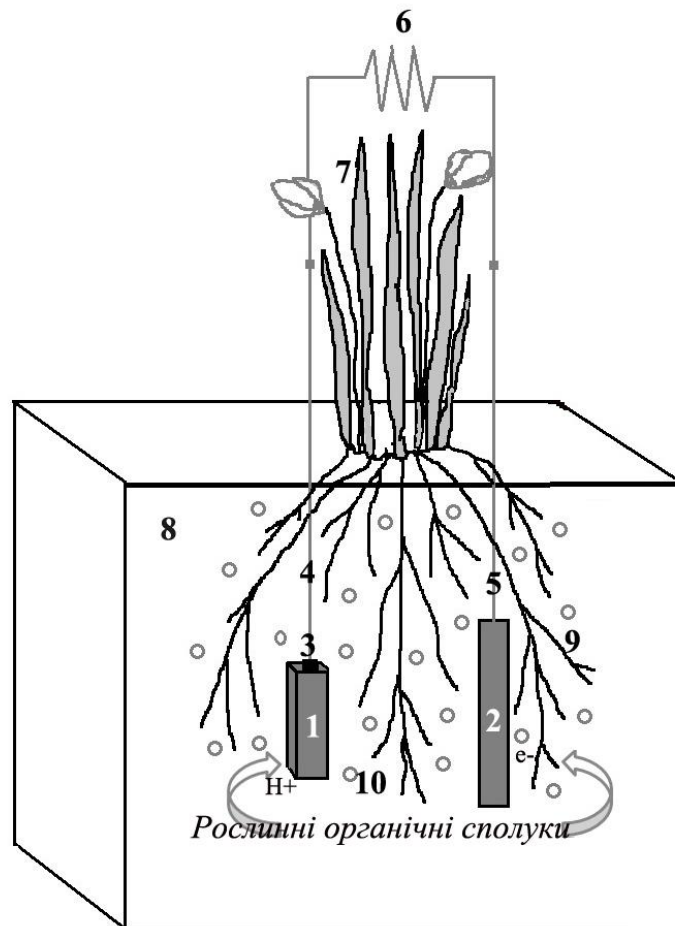


Рис. 3.2.1 Структура біомодуля отримання біоелектрики з глибинного шару ґрунту за допомогою двоелектродної біосистеми:

1 – катод; 2 – анод; 3 – кріпильний елемент з нержавіючої сталі; 4 – під'єднаний до катоду ізолюваний мідний дріт; 5 – під'єднаний до аноду мідний дріт, запаяний олов'яним сплавом; 6 – зовнішній електричний ланцюг, що містить споживач енергії; 7 – рослинний покрив ґрунту, що виділяє субстрат для підтримки розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів; 8 – ґрунтовий субстрат; 9 – корені рослин, через які транспортуються продукти фотосинтезу; 10 – ґрунтові ризосферні мікроорганізми, які донують електрони та протони.

3.3 Розробка багатоелектродних біосистем отримання біоелектрики

Запропонований вище спосіб отримання біоелектрики за допомогою двоелектродної системи з лише однією парою електродів є локальними і

придатними для невеликого контейнера з рослинами, проте не дозволяє зібрати повністю всю біоелектрику з усієї площі великої ділянки ґрунту чи контейнера із субстратом, засадженого рослинами. Крім того, теоретично, поєднання кількох електродів в одну електродну систему в межах одної біосистеми мала б привести до підвищення її ефективності. Але, в той же ж час, дослідники МФС стикнулися з втратами біоелектрики і реверсією напруги в деяких випадках. Тому ми поставили перед собою завдання розробити ефективну модель багатеелектродної біосистеми для отримання біоелектрики малозатратним способом.

Дану біотехнологічну задачу розв'язує пропозиція з'єднання між собою мідними полівінілхлоридно-ізолюваними дротами графітових катодів (відходів) у систему катодів та перфорованих оцинкованих сталевих анодів у системи анодів і розміщення їх по всій площі контейнера, на глибині у ґрунті вздовж усіх сторін контейнера та на дні, де розвиваються корені висаджених рослин та вивільнюються електрони і протони за участю ґрунтових бактерій (рис. 3.3.1) (Rusyn & Medvediev, 2018). Рух електронів та протонів, які виділяються ґрунтовими мікроорганізмами під впливом корневих виділень рослин створює електричний струм, який реєструє система електродів, розміщена у товщі субстрату по периметру та на дні контейнера.

Проведені дослідження по визначенню сили струму під навантаженням $10 \text{ } \Omega$ у біосистемах (в контейнерах площею 0.0525 м^2) з рослинами за допомогою двох систем електродів: двоелектродної системи I, що складалася з пари одного катоду та одного аноду та багатеелектродної системи II із 12-ти анодів та 10-ти катодів показують, що отримана сила струму в 10.1 раз була вища при використанні мультиелектродної системи II в порівнянні з моноелектродною системою I ($P < 0.05$) (рис. 3.3.2).

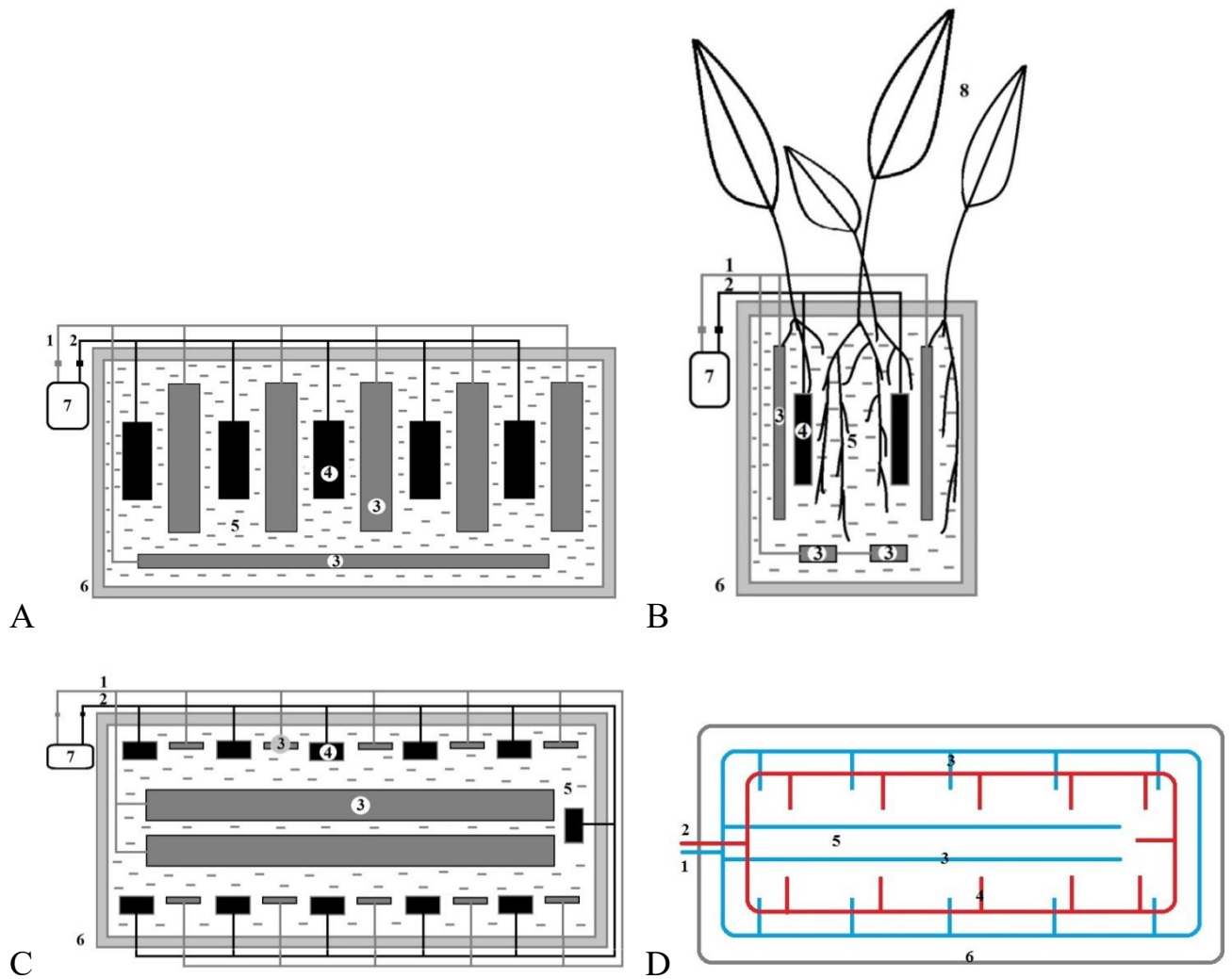


Рис. 3.3.1 Схематичне зображення багатеелектродної біосистеми для збору біоелектрики в контейнерах: (А) вигляд збоку з висадженою рослиною; (В) фронтальне зображення; (С) вигляд згори; (D) спрощений вигляд:

1 – вихід дроту, що з'єднує систему з 12 анодів; 2 – вихід дроту, що з'єднує систему з 10 катодів; 3 – анод; 4 – катод; 5 – субстрат, в який ґрунтові мікроорганізми виділяють електрони та протони; 6 – контейнер; 7 – зовнішній електричний ланцюг, що містить споживач енергії; 8 – рослини, що через коріння екскретують речовини для підтримки розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів

Якщо при використанні моноелектродної системи в середньому сила струму

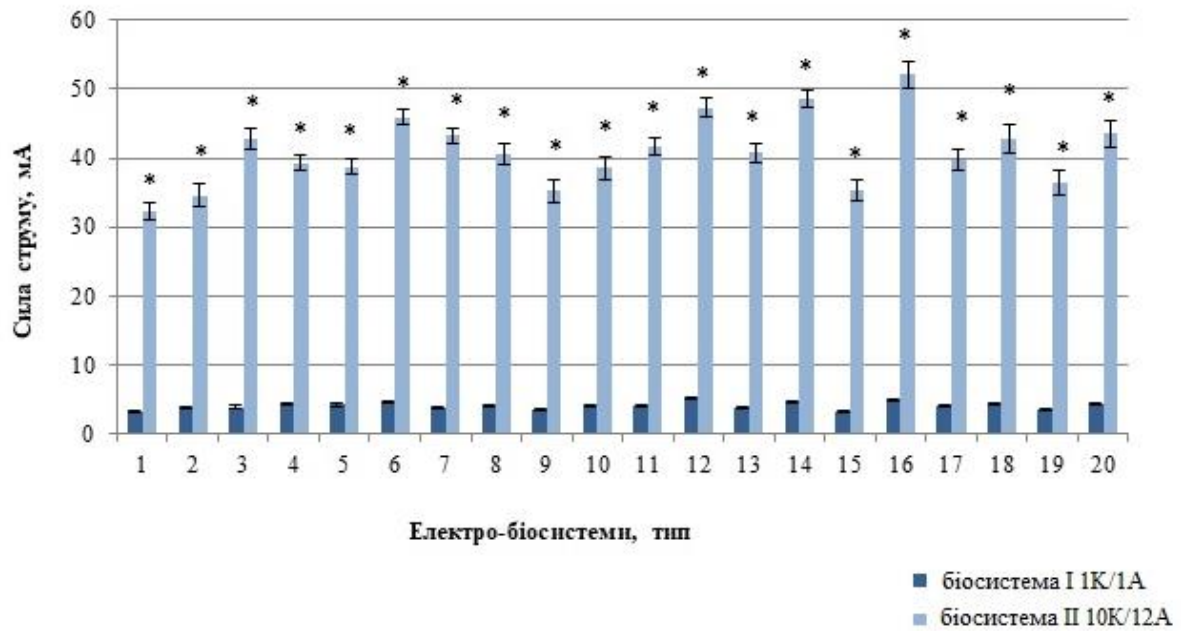


Рис. 3.3.2 Вплив багатоелектродності біосистеми на генерацію сили струму в 20-ти різних біосистемах (10 Ω) ($x \pm SE$, $n=20$).

Двоелектродна система I складається з: 1 катоду та 1 аноду. Багатоелектродної системи II складається з 10 катодів та 12 анодів

* Сила струму багатоелектродної системи II (10K/12K) суттєво перевищує таку моноелектродної системи I (1K/1A) ($P < 0.05$)

становить 4.06 мА, то при застосуванні багатоелектродної електро-біосистеми 40.98 мА. Суттєво вищі показники струму отримані багатоелектродною біосистемою в порівнянні з двоелектродною можна пояснити як збільшенням площі поверхні електродів, так і охопленням електродами всієї товщі ґрунту контейнера з рослинами, що розвиваються там. Це дозволяє в повнішій мірі реєструвати електричний струм, що створюється рухом електронів та протонів, які виділяються ґрунтовими мікроорганізмами під впливом корневих виділень рослин. Аналогічну закономірність було продемонстровано на MFC. Багатоелектродний мікробний паливний елемент з чотирма парами катод/анода виробляв в 3.2 рази більшу щільність потужності, ніж MFC з одинарною парою електродів (Ren et al., 2012; Jung & Pandit, 2019). MFC з багатоелектродними

системами забезпечують додаткові шляхи для передачі електронів і збільшують швидкість реакції відновлення (Jung & Pandit, 2019). Таким чином, з допомогою багатоелектродної біосистеми можна збирати рослинно-мікробну біоелектрику з усієї площі та товщі ґрунту контейнера з рослинами більш ефективно.

3.4 Стекування багатоелектродних біосистем для збільшення ефективності отримання біоелектрики шляхом паралельно-послідовного підключення

Багатоелектродні системи в порівнянні з двоелектродними дозволяють максимальніше зібрати рослинно-мікробну біоелектрику, проте, все ж, залишаються менш ефективними, ніж теоретично розраховані потенціально можливі у даній біотехнології (Strik et al., 2011). Якщо розглянути кожний електро-біосистемний контейнер з рослинами як окрему енергетичну комірку, теоретично, паралельне та послідовне їх під'єднання може ще далі збільшити отримувані біоелектричні параметри. В MFC технології було показано, що підключення декількох паливних елементів послідовно додавало напруги, в той час як з'єднання паливних елементів паралельно збільшувало струм. Алтерман та інш. (Altermann et al., 2006) виявили, що струм є в шість разів нижчим при послідовному з'єднанні порівняно із паралельним з'єднанням. Проте, використання паралельно-послідовного підключення стикається з проблемами втрати потужності (Jung & Pandit, 2019). При послідовних з'єднаннях багатьох MFC можлива реверсія напруги (Oh & Logan, 2007). Щоб перевірити нашу гіпотезу впливу на біоелектричні параметри біосистем паралельного та послідовного з'єднання, в 2014 році нами було проведено серію дослідів із різними типами з'єднання електро-біосистемних контейнерів.

Для визначення впливу на отримання біоелектрики паралельного і послідовного підключення було сконструювано наступні комплексні мультиелектродні системи з простих багатоелектродних систем (рис. 3.4.1 та рис.3.4.3).

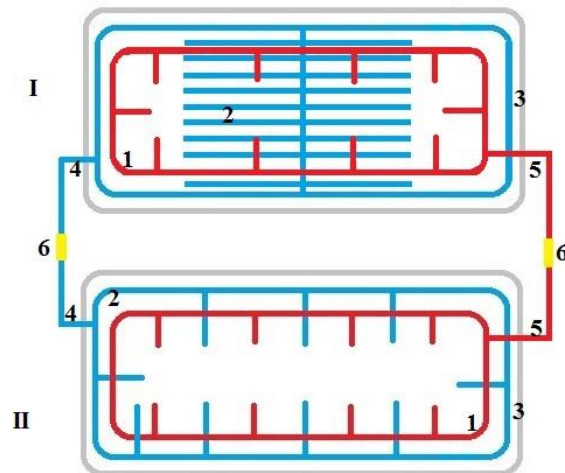


Рис. 3.4.1 Схематичне зображення комплексної мультиелектродної біосистеми, сформованої шляхом паралельного з'єднання двох багатоелектродних біосистем:

(I) біосистеми, що складається з 10 катодів / 9 анодів та

(II) біосистеми, що містить 8 катодів / 9 анодів:

1 – катодна система; 2 – анодна система; 3 – електро-біосистемний контейнер;
4 – вихід дроту, що поєднує анодну систему; 5 – вихід дроту, що з'єднує катодну систему; 6 – паралельне з'єднання біосистем

Паралельне з'єднання двох багатоелектродних біосистем I та II, що склалися з 10 катодів/9 анодів та з 9 катодів/9 анодів (рис. 3.4.1) приводило до збільшення середньої сили струму під навантаженням 10Ω в 2.1 раз, в порівнянні з з силою струму, що генерувала одна біосистема ($P < 0.05$) (рис. 3.4.2). Максимальна зафіксована сила струму становила 199.2 мА та перевищувала середні значення в 4.2 рази. Генерована сила струму кожною багатоелектродною біосистемою з 9 катодами та 10 катодами по окремості становила 45.6 – 49.2 мА відповідно, а отже зменшення кількості електродів незначно позначилося на отримуваних показниках електро-біосистемного контейнера площею 0.0525 м^2 ($p > 0.753$) (рис. 3.4.2).

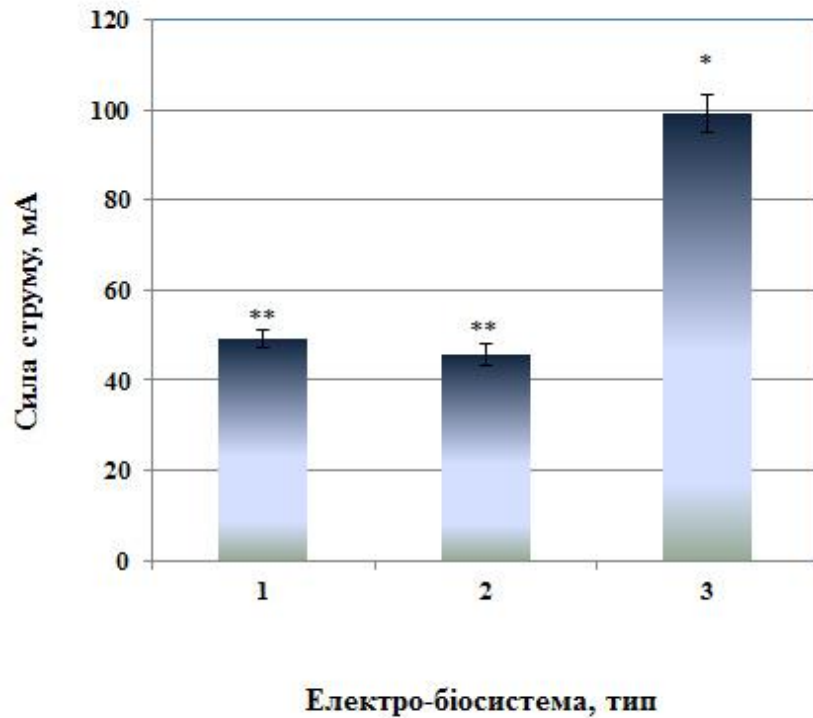


Рис. 3.4.2 Сила струму біосистеми 1 (10К/9А), 2 (9К/9А) та паралельно з'єданого комплексу біосистем 3 (10К/9А+9К/9А), 10 Ω ($\bar{x} \pm SE$, n=10).

*Зростання сили струму є статистично значимим при паралельному стекуванні біосистем 1 і 2 ($P < 0.05$)

**Різниця між силою струму біосистеми 1 та 2 є незначною ($p > 0.753$);

Іншу комплексну мультиелектродну біосистему сформували із шести однакових багатоелектродних біосистем (8 катодів/8 анодів), використовуючи, як паралельне, так і послідовне їх з'єднання. Паралельне з'єднання двох комплексів біосистем, що склалися кожна з трьох послідовно з'єднаних багатоелектродних біосистем (рис. 3.4.3) приводило до статистично істотного зростання біоелектричних параметрів (рис. 3.4.4). Послідовно з'єднували багатоелектродні біосистеми I–III наступним чином: через зв'язок катодної системи I і анодної системи II, та катодної системи II і анодної системи III біосистем. Електро-біосистеми IV–VI послідовно підключали через зв'язок катодної системи IV і анодної системи V, та катодної системи V і анодної системи VI біосистем (рис. 3.4.3). Послідовно з'єднані біосистеми I–III та IV–VI поєднували паралельно

шляхом зв'язку дротів від анодних систем I та IV та катодних систем III та VI (рис. 3.4.3).

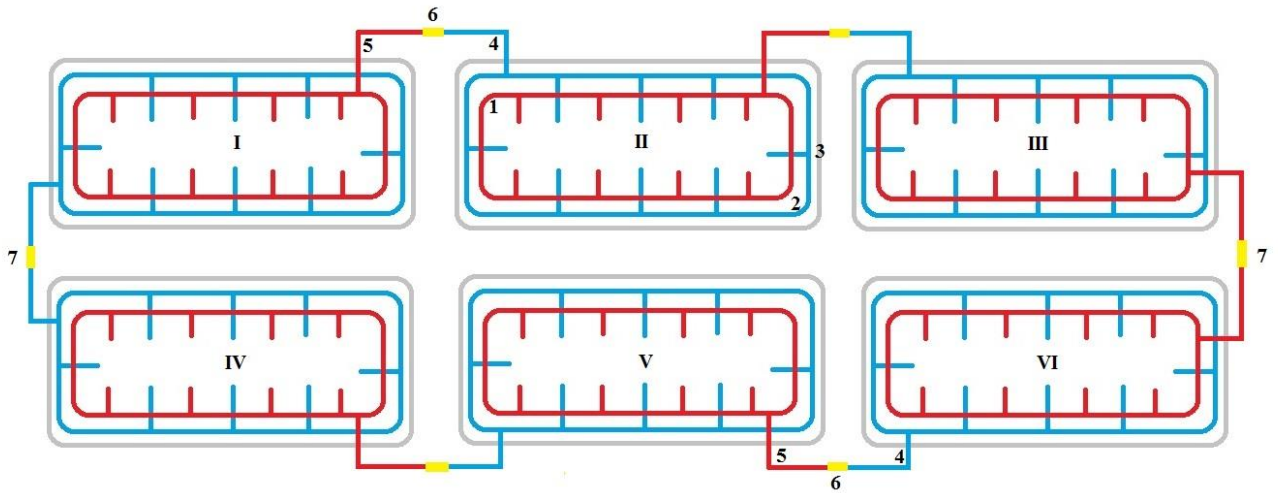


Рис. 3.4.3 Схематичне зображення комплексної мультиелектродної біосистеми, сформованої шляхом паралельно-послідовного з'єднання багатоелектродних біосистем I - VI:

- 1 – катодна система; 2 – анодна система; 3 – електро-біосистемний контейнер;
 4 – вихід дроту, що поєднує анодну систему; 5 – вихід дроту, що з'єднує катодну систему;
 6 – послідовне з'єднання багатоелектродних біосистем;
 7 – паралельне з'єднання послідовно підключених біосистем I – III та IV–VI

Послідовне з'єднання трьох багатоелектродних біосистем приводило до збільшення отримуваної напруги в 2.9 раз. Якщо середній біоелектричний потенціал однієї багатоелектродної біосистеми (8K/8A) складав 1.1 В, то комплексної мультиелектродної біосистеми (8K/8A+8K/8A+8K/8A) - 3.2 В ($P < 0.05$) (рис. 3.4.3). Паралельне з'єднання двох трьох-послідовно з'єднаних біосистем (8K/8A+8K/8A+8K/8A)+(8K/8A+8K/8A+8K/8A) не позначалося на зміні біоелектричного потенціалу ($P > 0.05$). Напруга 3-ох послідовно-з'єднаних біосистем (3), як комплексної біосистеми із двома паралельно з'єднаними послідовно-з'єднаними біосистемами (3+3) становила 3.230 та 3.244 В, відповідно.

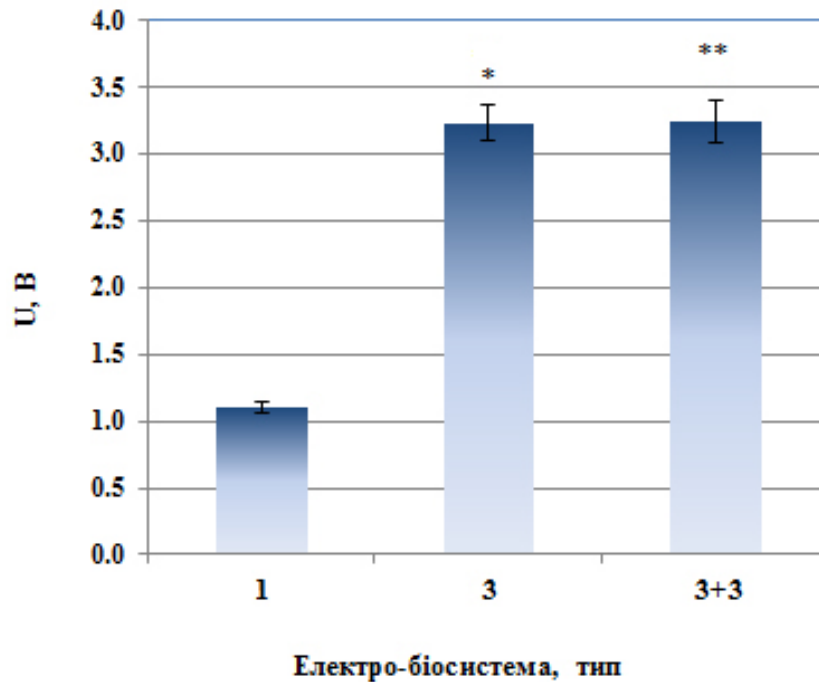


Рис. 3.4.4 Напруга біосистеми 1 (8K/8A) та послідовно з'єданого комплексу трьох біосистем 3 (8K/8A+8K/8A+8K/8A) та паралельно стекованих 3+3 (8K/8A+8K/8A+8K/8A)+(8K/8A+8K/8A+8K/8A) ($x \pm SE, n=10$)

*Послідовне стекування трьох біосистем веде до суттєвого росту напруги ($P < 0.05$)

**Паралельне з'єднання двох стеків із трьох послідовно поєднаних біосистем не приводить до росту напруги ($P > 0.05$).

Зафіксований нами суттєвий ріст струму при паралельному під'єднанні багатоелектродних біосистем та суттєве зростання напруги при послідовному з'єднанні паралельно поєднаних біосистем є аналогічним до тенденцій, зафіксованих на біосистемах MFC. Подібні результати були отримані Памінтуан та інш.: послідовне з'єднання трьох PMFC приводило до отримання втричі більшої напруги, а їх паралельне підключення до втричі вищого струму (Pamintuan et al., 2018). Послідовне з'єднання трьох горщиків з *A. africanus*-PMFC приводило до росту біоелектричного потенціалу в 1.9 раз (Gomora-Hernandez et al., 2020). Будь-який бажаний струм або напругу можна отримати, поєднавши

відповідну кількість серійно і паралельно з'єднаних паливних елементів або джерел живлення (Jung & Pandit, 2019). Рівень потужності, необхідний для практичних застосувань був досягнутий лише завдяки складанню безлічі блоків MFC з комбінаціями послідовних / паралельних з'єднань (Walter et al. 2016).

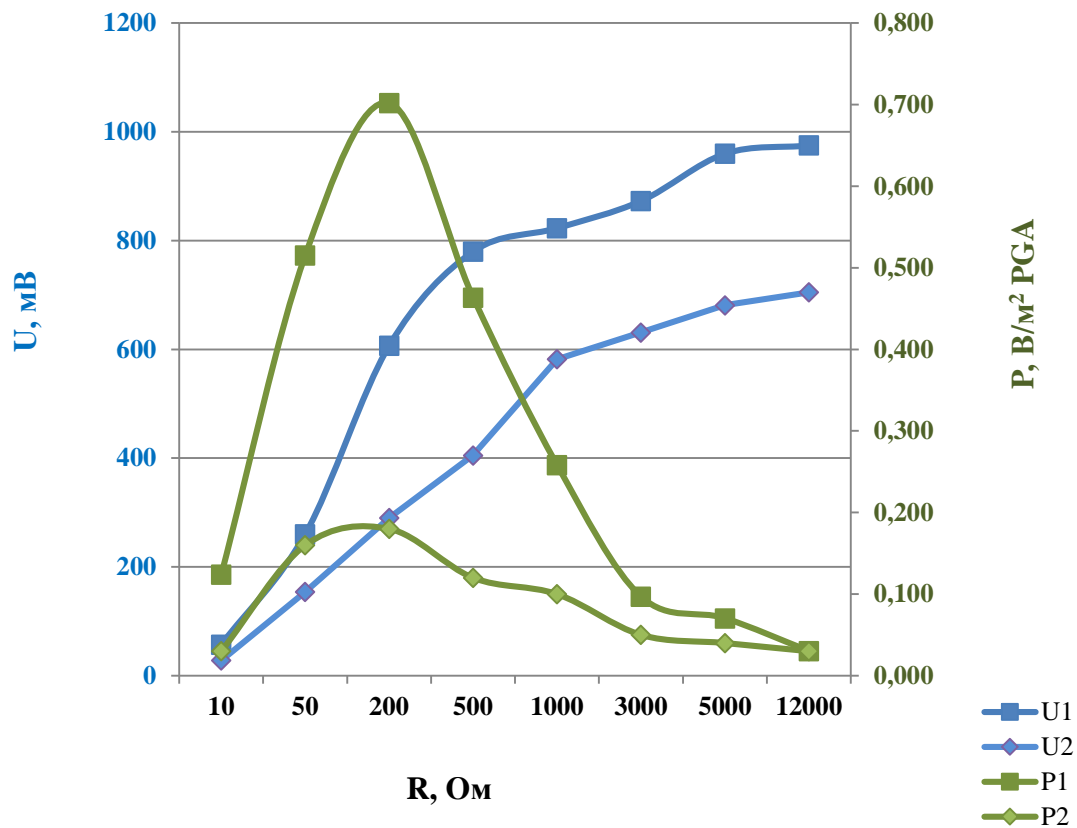


Рис. 3.4.5 Біоелектричні параметри багатоелектродної (10К/12А) (1) і двоелектродної (1К/1А) (2) електро-біосистеми
 U_1 і U_2 – напруга біосистем (1) і (2);
 P_1 і P_2 – густина потужності біосистем (1) і (2)

Багатоелектродні біосистеми були також ефективніші у поляризаційних експериментах. Як видно з рисунку 3.4.5 густина потужності багатоелектродних систем істотно перевищувала таку ж моноелектродних. Збільшення кількості електродів в межах одного біомодуля того самого розміру мало різний ефект на біоелектричні параметри біосистем в залежності від електричного опору

резисторів. Найбільш виражений ефект на потужність біосистем виявлявся в межах від 50 до 3000 Ом, що складав до 3.9 раз (рис. 3.4.5).

Отже, розроблені багатоелектродні біосистеми з 12 анодами та 11 катодами є більш ефективними, ніж двоелектродні, виробляючи в 10.1 раз вищий струм рівний 40.98 мА. Паралельне з'єднання двох багатоелектродних біосистем приводило до збільшення струму в 2.1 рази. Послідовне з'єднання трьох багатоелектродних біосистем призводило до збільшення напруги в 2.9 раза, при цьому їх паралельне з'єднання не підвищувало напругу, а послідовне не впливало на струм. Збільшення площі електродів одного біомодуля в 10 разів призводить до збільшення питомої потужності при 200 Ом в 3.95 раза. Таким чином, паралельно-послідовне з'єднання багатоелектродних біосистем різних конфігурацій, створених з нових ефективних та бюджетних електродів у комплексні мультиелектродні біосистеми відкриває шлях до максимізації отримання рослинно-мікробної біоелектрики.

3.5 Розробка компактних багатоелектродних біосистем для автономного живлення світлодіодів та метеостанцій в енергоефективних будинках

Розробка компактних багатоелектродних біосистем для автономного живлення електроприладів низького енергоспоживання представляє значний інтерес в енергоефективних будинках. Використання рослинно-мікробних біосистем для енергоживлення приладів лише розвивається. В останні роки представлено перші розробки PMFC технології придатної для живлення електроніки з низьким споживанням, базовані на керофітних рослинах: мохах (Bombelli et al., 2016), садовій тропічній рослині *Cordyline fruticosa* (de la Rosa et al., 2019), декоративній садовій південно-африканській рослині *Agapanthus africanus* (Gomora-Hernandez et al., 2020), сукулентах *Opuntia species* (Apollon et al., 2021). Вони показують хороші перспективи для енергоживлення радіо і датчика метеостанції (Bombelli et al., 2016), метео- та температурних сенсорів (Brunelli et al., 2017, de la Rosa et al., 2019), мобільного телефону (Gomora-

Hernandez et al., 2020), LED та цифрового годинника (Apollon et al., 2021). В основному ці розробки призначаються для використання в умовах на зовні і часто не характеризуються ергономічним дизайном.

Ми поставили перед собою завдання сконструювати компактну і бюджетну біосистему для використання в енергоефективних будинках, з новою електродною системою та новою рослиною, яка би могла автономно енергоживити прилади та одночасно слугувати джерелом для харчових потреб як кулінарна рослина або слугувати декоративною окрасою. Використання кулінарних трав в PMFC (Sophia & Sreeja, 2017, Chang et al., 2020), як і декоративних рослин (Azri et al., 2018, Sarma & Mohanty, 2018) залишається поки що в зародковому стані.

Для реалізації цієї ідеї була запланована розробка невеликих компактних мобільних рослинних вазонів з вмонтованими електродними системами та їх стекування шляхом паралельного і послідовного з'єднання, використовуючи дешеві підручні матеріали та відходи як для катодів, так і для контейнерів, дешево насіння трав чи дешеві широко поширені кімнатні рослини. Для конструювання ефективних компактних біосистем було поставлено вирішити такі завдання

- 1) вивчити вплив електродної площі та міжелектродної відстані на біоелектричні параметри електро-біосистем та підібрати оптимальну і бюджетну електродну конфігурацію на основі нових електродних матеріалів;
- 2) визначити вплив стекування на максимізації показників біоелектрики,
- 3) дослідити використання кулінарної рослини кімнатного базиліку *Ocimum basilicum* та декоративної рослини солейропії *Helcine soleirolii* як біологічного компонента в складі електро-біосистем.

Електро-біосистема представляє собою складний гібридний біотехнологічний пристрій, в якому поєднуються як біологічні компоненти, такі як рослини та ризосферні мікроорганізми, так і технологічні компоненти у вигляді електродів та електричного ланцюга. Як біологічні компоненти, і зокрема, вид рослин, тип секреторних сполук, інтенсивність фотосинтезу, так і технічні, такі як електродні

матеріали, міжелектродна відстань, площа електродів, величина зовнішнього навантаження, тощо, мають велике значення для ефективного функціонування електро-біосистем. Ще в 2006 році на MFC було показано, що зменшуючи відстань між електродами в мікробно-паливному реакторі можна збільшити його потужність (Cheng et al., 2006). Аналогічні тренди були зафіксовані в наступному дослідженні, демонструючи перевагу 10 см відстані між електродами над 12 і 15 см дистанцією, що виражалися в збільшенні напруги та сили струму MFC (Sangeetha & Muthukumar, 2013). Янг та інші в 2018 році представили дослідження ролі співвідношення площі катоду і аноду для роботи седиметаційних MFC, де показали реверсію напруги в неоптимізованих по електродній площі біосистемах (Yang et al., 2018). Дослідження з рослинними UF-CWMFC, польовими рис базованими MFC та PMFC з *Cyperus involucratus* продемонстрували, що відносне положення анода і катода (Oon et al., 2015) та розмір електродів (Klaisongkram and Nolasut, 2014; Ueoka et al., 2016) є важливими факторами, що розглядаються під час моделювання гібридних та класичних PMFC. Розташування електродів у субстраті з коренями рослин та ґрунтовими мікроорганізмами має значний вплив на вихідну потужність біосистеми (Nitorisavut & Regmi, 2017, Kabutey et al., 2019). Нещодавно, Памінтуан та інші, дослідники з Філіпін, показали, що із зростанням кількості електродів та збільшенням їх сумарної площі зростає і генерована біоелектрика в PMFC з рослиною *Cynon dactylon* та ґрунтом як субстратом (Pamintuan et al., 2020). Окрім небагаточисельних окремих робіт на дану тему, дослідження впливу площі електродів, ефекту відстані між електродами на енергоефективність PMFC все ще залишаються маловивченими питаннями.

Ряска мала *Lemna minor L.* була обрана як біологічний компонент модельних біосистем для вивчення ефекту міжелектродної відстані та площі електродів. Її приналежність до гідатофітів та властивість не прикріплюватися коренями до ґрунту дозволяє легко змінювати положення електродів довкола плаваючих коренів рослин в процесі експерименту. Ряска *Lemna L.* належить до дрібних багаторічних, плавучих та занурених у воду рослин (Landolt, 1986, Gubanov et al., 2002). Це один з найбільш поширених видів ряски в Україні, а також по всьому

світу. Ряска мала зустрічається на всіх п'яти континентах, а також на океанічних островах (Gubanov et al., 2002, Ceschin et al., 2018). Космополізм рослини та висока швидкість росту робить її привабливим об'єктом вивчення електробіотехнології. Час подвоєння біомаси ряски складає лише 1.34 – 4.54 дні (Ziegler et al., 2014). Природними біотопами *L. minor*. є стоячі і забруднені органікою води. Фіторе mediaційний потенціал ряски представляє додатковий плюс як компонента електро-біосистем, оскільки ряска здатна швидко та ефективно очищувати забруднені водойми та метатенки від нітратів і фосфатів (Cheng et al., 2002; Iqbal et al., 2019; Ceschin et al., 2020). Оптимізація технологічних параметрів електро-біосистем, і, зокрема, площі аноду і катоду та міжелектродної відстані є важливим як для підвищення їх потужності, так і для зменшення вартості PMFC та може бути ще одним кроком до розширення їх використання як джерела відновлюваної енергії.

Для вивчення впливу площі електродів було розроблено два типи електродних систем: з невеликою площею та в 2.5 рази більшою площею. Модельні біосистеми з *L. minor* із збільшеною електродною площею демонстрували вищі показники середньої сили струму та біоелектричного потенціалу, ніж біосистеми з електродами меншої площі, як при вищому, так і при нижчому зовнішньому навантаженні. Як представлено на рис. 3.5.1 середня сила струму біосистем із електродною площею 0.015 м² становила 0.317 мА супроти 0.129 мА в біосистем із електродною площею 0.006 м² при 130 Ом, зростання біоелектричних показників становило 2.46 раз.

Ефект збільшення площі електродів на ріст біоелектричних показників також виявлявся при більшому опорі, але дещо в меншій мірі (рис. 3.5.2). Так, збільшення електродної площі в 2.5 рази при 1130 Ом привело до зростання середнього біоелектричного потенціалу у 1.76 раз, в порівнянні із зростанням сили струму в 2.46 раз при використанні на 1000 Ом нижчого навантаження. Очевидно, за вищих навантажень в електро-біосистемах слабшає потік електронів порівняно з нижчими навантаженням та менш інтенсивно відбувається

метаболізм, при якому мікроорганізми віддають електрони на анод, результатом якого є генерація боелектрики (Sangeetha & Muthukumar, 2013).

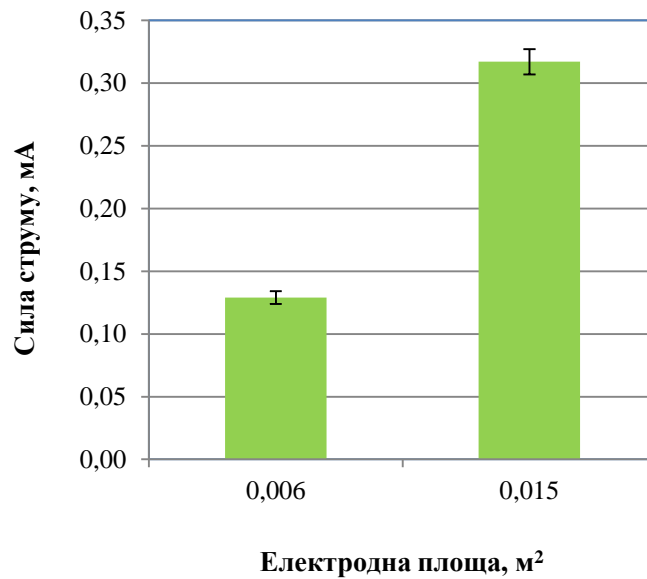


Рис. 3.5.1 Залежність сили струму від електродної площі біосистеми з *L. minor* при підключенні резисторів 130 Ом протягом 7 діб ($x \pm SE, n=10$)

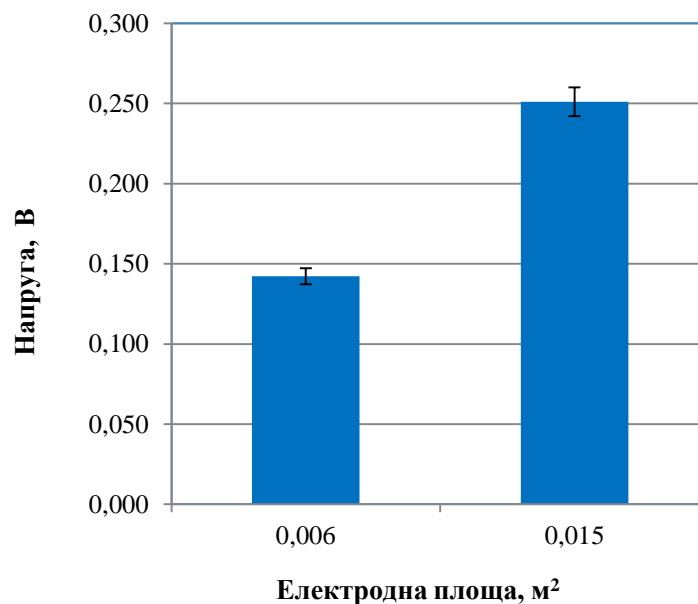


Рис. 3.5.2 Вплив збільшення електродної площі на показники середньої напруги біосистеми з *L. minor* при підключенні резисторів 1130 Ом протягом 7 діб ($x \pm SE, n=10$)

Генерація струму біосистемами з *L. minor* характеризувалася наступною динамічною картиною, що супроводжувалася підйомами та падіннями струму (рис. 3.5.3). На протязі 7 днів реєстрована сила струму коливалася від 0.285 мА до 0.431 мА в біосистемах з площею електродів 0.015 м² при 130 Ом.

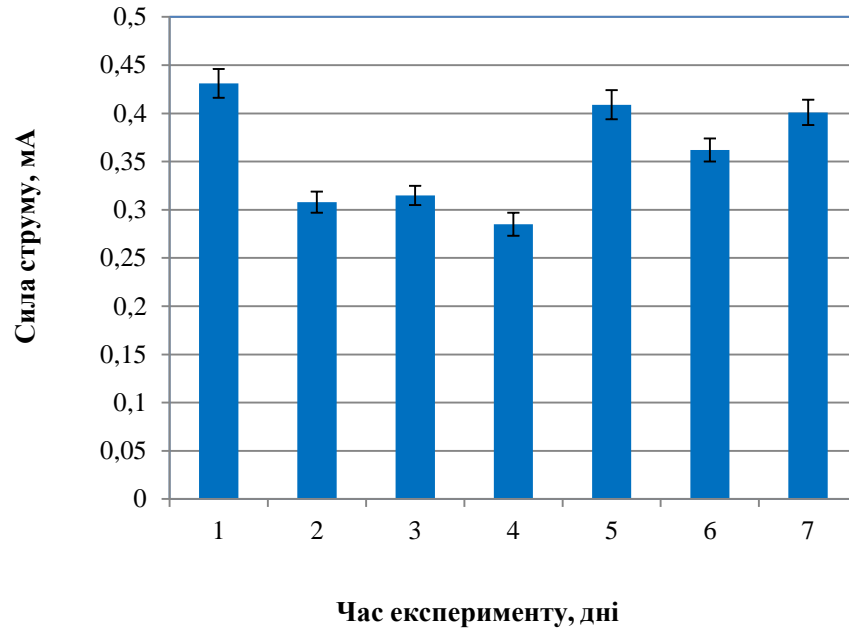


Рис. 3.5.3 Динаміка зміни біоелектричних параметрів біосистеми з *L. minor* при 130 Ом на протязі 7 діб ($x \pm SE, n=10$)

Оскільки продукування біоелектрики залежить від постачання їх субстратами від рослин, які виступають донорами електронів для електро-активних мікроорганізмів (Strik et al., 2008), очевидно, динамічні коливання сили струму зумовлені різною інтенсивністю фотосинтезу та відповідно рівнем кореневої екскреції речовин, що змінюються в залежності від інтенсивності природного освітлення.

Для підбору оптимальної міжелектродної відстані для біосистем було проведено оцінку залежності динамічних коливань напруги та сили струму від дистанції між електродами в межах 1-10 см при 500, 1000 Ом та без резисторів (струм короткого замикання та напруга відкритого кола). Змінюючи міжелектродну відстань між катодом і анодом від 10 см до 1 см в рослинно-мікробних біосистемах було виявлено зростання сили струму короткого

замикання із зменшенням цієї відстані, що представлено в таблиці 3.5.1. Із скороченням відстані між катодом та анодом на кожний 1 см реєстрована сила струму зростала в середньому на 0.098 мА.

Таблиця 3.5.1. Залежність сили струму короткого замикання від міжелектродної відстані біосистеми з ряскою *L. minor* ($\bar{x} \pm SE$, n=10)

Міжелектродна відстань, см	Струм короткого замикання, мА
10	2.081±0.033
9	2.175±0.065
8	2.284±0.079
7	2.325±0.102
6	2.430±0.085
5	2.524±0.072
4	2.610±0.061
3	2.716±0.074
2	2.801±0.065
1	2.962±0.077

Ефект позитивного впливу редукування міжелектродної відстані на силу струму та біоелектричний потенціал проявлявся також при короткочасовому підключенні резисторів 500 Ом та 1000 Ом. Як видно з рисунку 3.5.4 при підключенні резистора 500 Ом при 1 см-відстані між катодом і анодом можна було зареєструвати вищу силу струму, ніж коли відстань між ними складала 10 см. Подібно зростав біоелектричний потенціал при зменшенні міжелектродної відстані при навантаженні 500 Ом (рис. 3.5.5) та 1000 Ом (рис. 3.5.6). Біоелектричний потенціал зростав на 0.089 В при скороченні міжелектродної відстані з 10 см до 5 см та на 0.092 В із зменшенням відстані із 5 см до 1 см при короткочасовому підключенні резистора 500 Ом. При застосуванні резистора

1000 Ом ця різниця була менш вираженою, біоелектричний потенціал зростав на 0.012 В та 0.010 В (рис. 3.5.6).

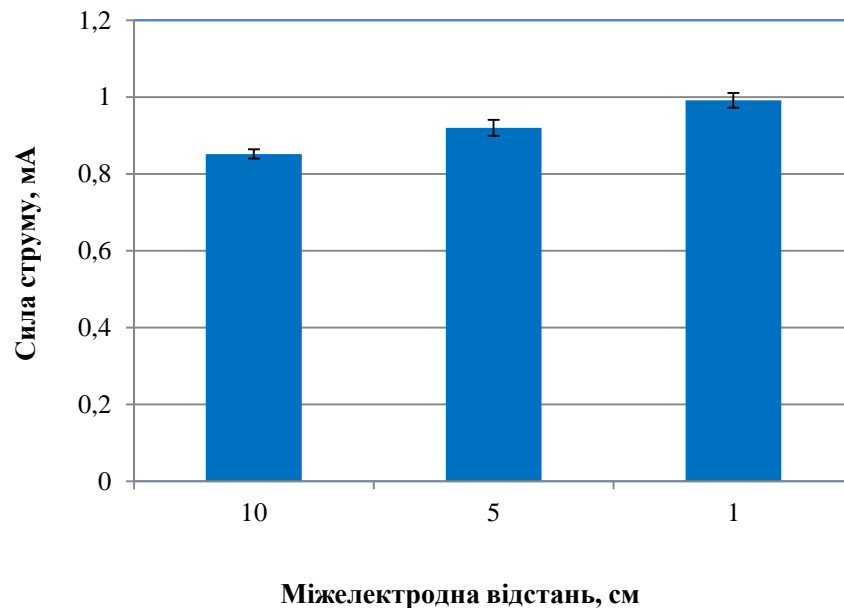


Рис. 3.5.4 Залежність міжелектродної відстані та сили струму електро-біосистеми з *L. minor* при короткотривалому навантаженні 500 Ом ($x \pm SE$, $n = 5$)

Отже, біосистеми з міжелектродною відстанню 1 см характеризувалися на 0.140 – 0.881 мА вищими показниками сили струму від біосистем з 10 см міжелектродною відстанню в залежності від навантаження. Очевидно, зменшення відстані між електродами створює оптимальні умови для більш повного та швидшого транспорту електронів і протонів до катодної області та зменшує внутрішній опір, тим самим збільшуючи струм і продуктивність системи (Sleutels et al., 2009, Sangeetha & Muthukumar, 2013). А також, очевидно, менша міжелектродна відстань знижує контакти з мікроорганізмами-конкурентами електронів та протонів, відповідно запобігаючи втратам біоелектрики. Якщо відстань між електродами велика це може привести також до інших реакцій відновлення на шляху до катоду за участю протонів, тим самим зумовлюючи послаблення катодної реакції, зв'язаної з генерацією біоелектрики. В дослідженнях з мікробними електро-біосистемами (Cheng et al., 2006, Sangeetha & Muthukumar, 2013) було показано, що біосистеми з меншою міжелектродною відстанню демонструють вищі показники біоелектрики, ніж ті, що розміщені на

більшій відстані. Оскільки, біоелектричний принцип роботи як мікробних, так і рослинно-мікробних біосистем є спільним, як показують наші результати, даний принцип та схема є ефективними і для рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики.

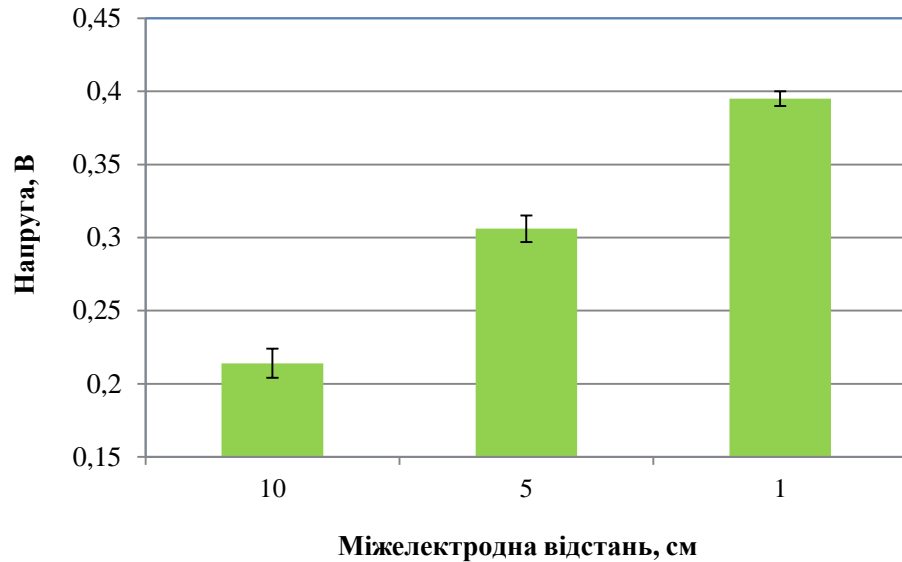


Рис. 3.5.5 Вплив міжелектродної відстані на напругу біосистеми з *L. minor* при короткотривалому навантаженні 500 Ом ($\bar{x} \pm SE$, n = 5)

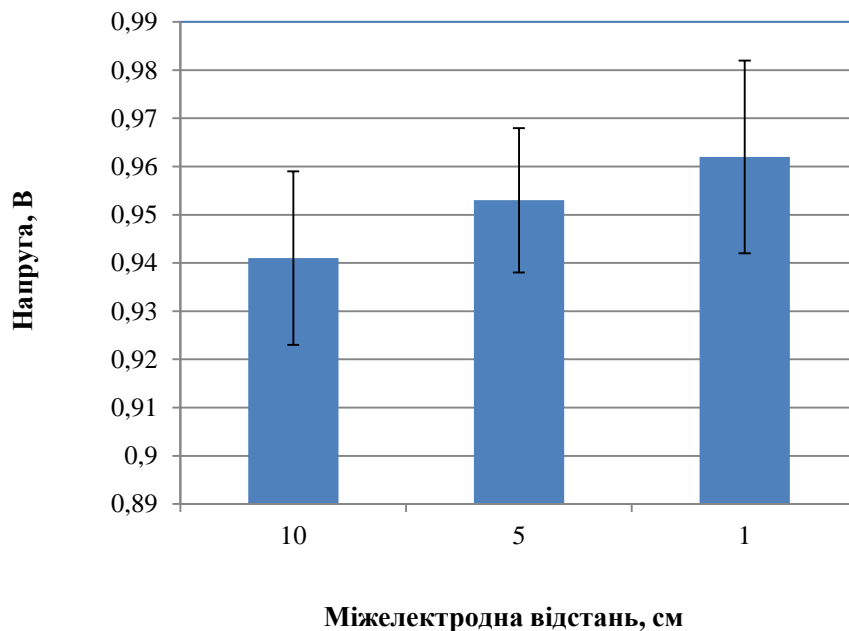


Рис. 3.5.6 Залежність напруги від міжелектродної відстані біосистеми з *L. minor* при короткотривалому навантаженні 1000 Ом ($\bar{x} \pm SE$, n = 5)

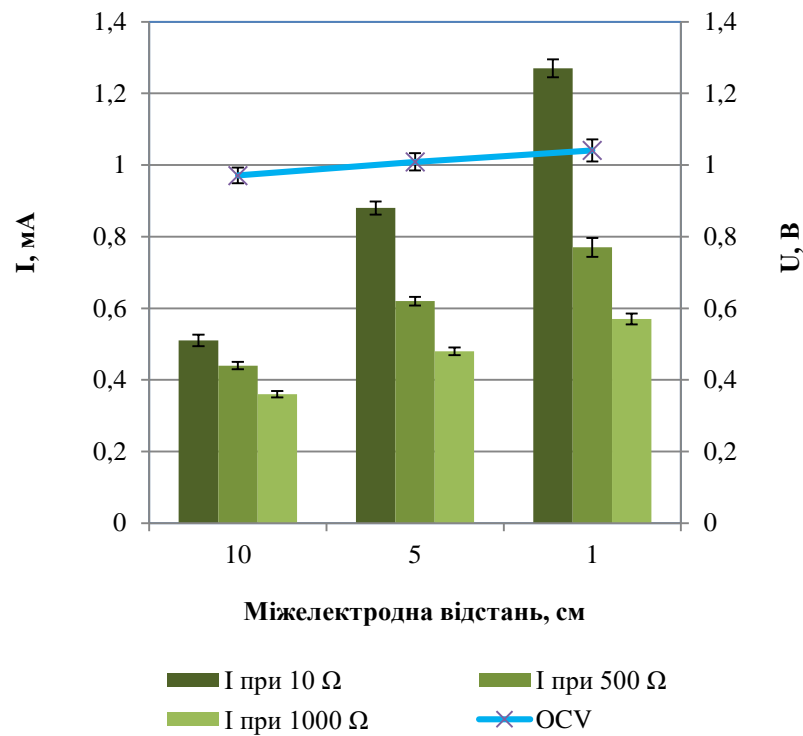


Рис. 3.5.7 Вплив міжелектродної відстані на напругу відкритого кола (OCV) та силу струму (I) біосистеми з *H.soleirolii* при короткотривалому навантаженні 10, 500, 1000 Ω ($x \pm SE, n=10$)

Як видно з рис. 3.5.7 аналогічний ефект редукування міжелектродної відстані був виявлений і в рослинно-мікробних біосистемах з *H.soleirolii*. Для визначення оптимальної міжелектродної відстані між катодом і анодом було оцінено динамічні коливання сили струму при редукації електродної відстані від 10 до 1 см (рис. 3.5.8) при 10, 500, 1000 Ом, а також напруги відкритого кола. Біосистема з 1 см електродною відстанню характеризувалися вищими показниками біоелектрики, ніж біосистема з 10 см електродною відстанню (рис. 3.5.7) в умовах як закритого, так і відкритого кола. Скороченням відстані між катодом та анодом дозволяло отримати струм вищий на 0.21-0.76 мА в залежності від застосованого опору та в середньому на 70 В вищий OCV. Найбільш виражений ефект позитивного впливу редукування міжелектродної відстані на силу струму

виявлений при застосуванні менших опорів, що може мати практичне значення для енергоживлення приладів, які передбачають невисокі опори.

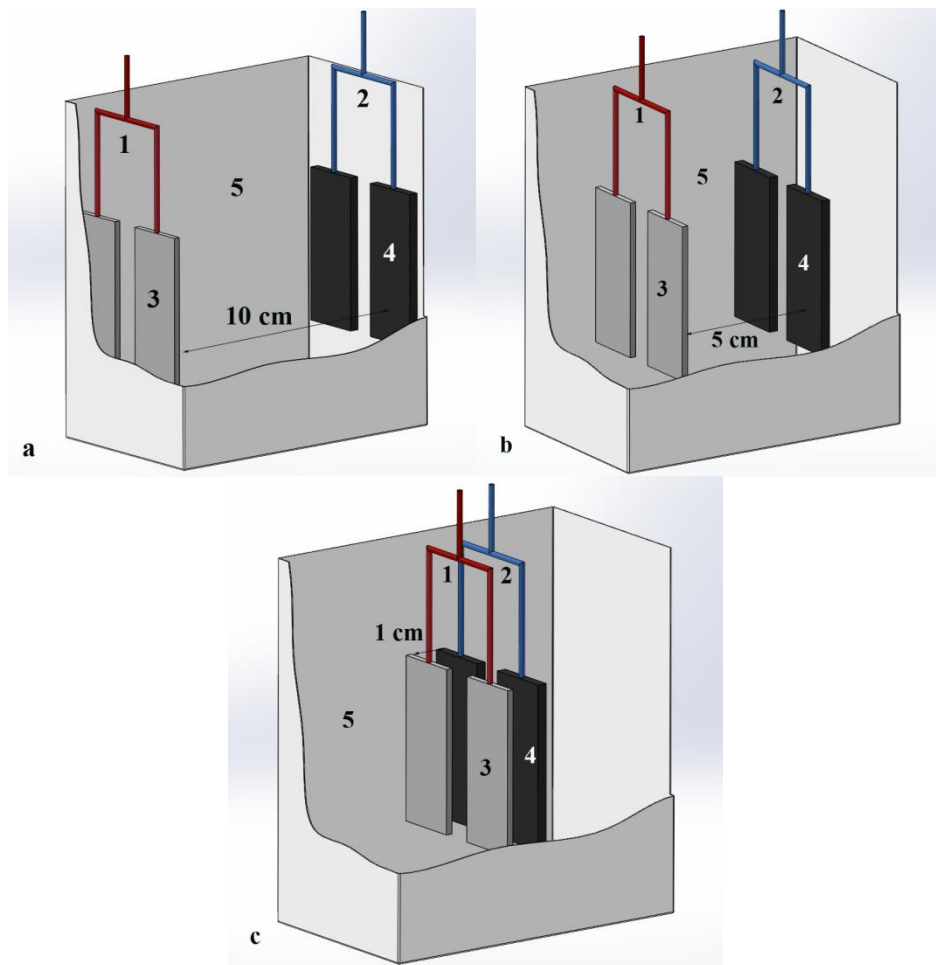


Рис. 3.5.8 Типи електродних конфігурацій рослинно-мікробних біосистем з міжелектродною відстанню (а) 10 см, (б) 5 см і (в) 1 см: 1 – анодна система з двох паралельно з’єднаних анодів, 2 – катодна система з двох паралельно з’єднаних дротами катодів, 3 – аноди, 4 – катоди, 5 – ґрунтовий субстрат

Отже, збільшення площі електродів та скорочення міжелектродної відстані є способом максимізації отримуваної біоелектрики в електро-біосистемі. Дослідження електро-біосистеми з *L. minor* при довготривалому застосуванні резисторів показали зростання показників біоелектрики в середньому в 2.46 раз із збільшенням площі електродів в 2.5 раз при використанні резисторів 130 Ом та в

1.76 раз при навантаженні 1130 Ом. Продемонстровано зростання показників біоелектрики до 1.8 раз із скороченням відстані між електродами від 10 см до 1 см як при використанні опорів, так і без застосування навантаження. Таким чином, виявлені ефекти позитивного впливу редукування міжелектродної відстані та збільшення електродної площі на силу струму та біоелектричний потенціал мають важливе значення для конструювання ефективних біосистем.

Враховуючи закономірності дослідженого вище впливу електродної площі та міжелектродної відстані було поставлено завдання сконструювати ефективну та компактну (об'ємом 0.6 – 0.7 л) рослинно-мікробну біосистему та вивчити ефект стекування біомодулів на біоелектричні параметри. Оскільки ця стратегія показала себе ефективною в підвищенні електропродуктивності для мікробних біосистем MFC та, як вище досліджено в цій роботі, для рослинно-мікробних біосистем.

Використовуючи електроди більшої площі, та розташовуючи їх на відстані 1 см один від одного, було сконструювано 4-ти електродну та 8-ми електродну біосистеми (рис. 3.5.9). Біомодулі, сконструйовані шляхом паралельного з'єднання катодів та паралельного з'єднання анодів характеризувалися середнім вольтажем відкритого кола 0.983 В та 1.170 В для 4- та 8-електродних біосистем, відповідно. При збільшенні кількості електродів вдвічі з 4-ьох до 8-ми, біоелектричний потенціал та сила струму зростали на 0.187 В (рис. 3.5.10) і на 1.311 мА (рис. 3.5.11), відповідно.

Незначне, в 1.2 рази, зростання біоелектричних показників при збільшенні кількості електродів до 8-ми, очевидно, пов'язано з майже оптимальною площею електродів на даний об'єм біосистеми у випадку 4-електродної біосистеми. Враховуючи те, що при цьому для конструювання 8-ми електродного модуля використано в 2 рази більше електродів, 4-електродний модуль було обрано як більш бюджетну і ефективну біосистему для подальших експериментів із нарощенням біоелектричних параметрів шляхом стекування модулів (рис. 3.5.12)

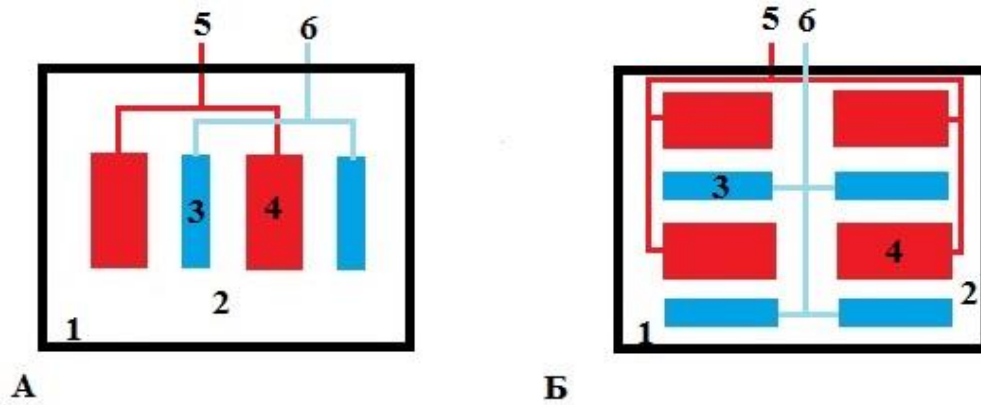


Рис. 3.5.9 Типи електродних конфігурацій рослинно-мікробних біосистем: А – чотириелектродні біосистеми та В – восьмиелектродні біосистеми: 1 – контейнер, 2 – субстрат, 3 – анод, 4 – катод, 5 – дроти поєднуючі паралельно з'єднані катода, 6 – дроти поєднуючі паралельно з'єднані аноди

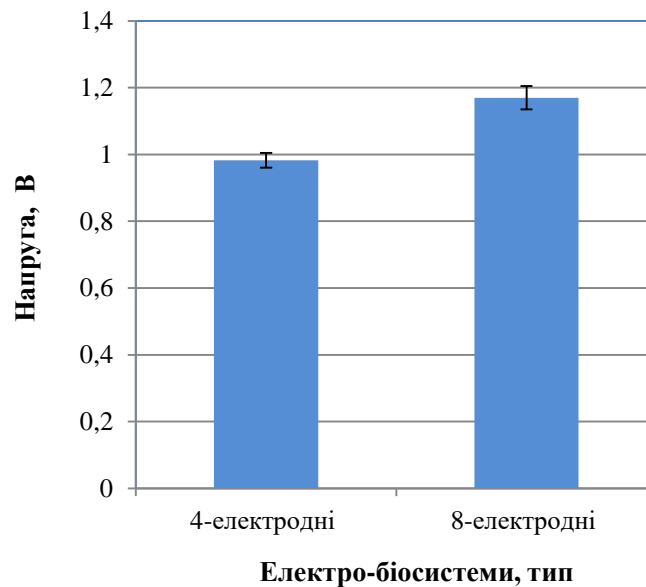


Рис. 3.5.10 Залежність напруги від збільшення кількості електродів з 4-ьох до 8-ми у біосистемі з *L. minor* (0.7 л) ($x \pm SE$, n=5)

Вид рослин змінював біоелектричні параметри аналогічних за структурою біосистем (рис. 3.5.13). Найвищою напругою характеризувалися біосистеми з *H. soleirolii*.

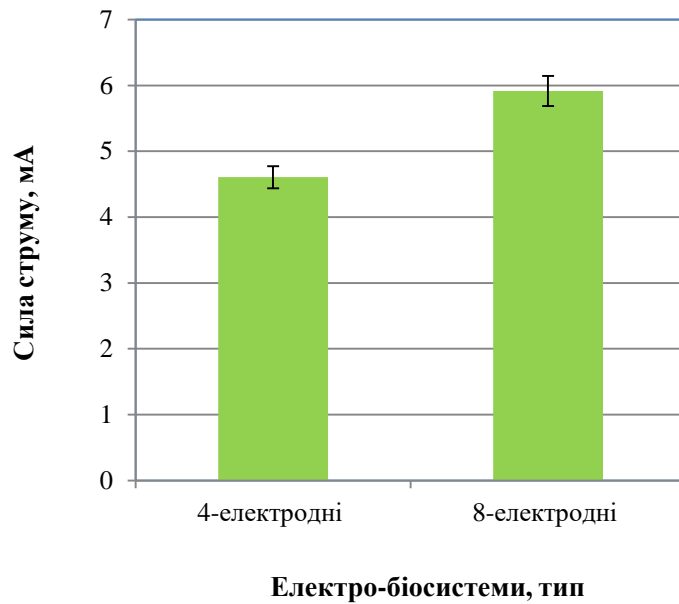


Рис. 3.5.11 Залежність силу струму від збільшення кількості електродів з 4-бох до 8-ми у біосистемі з *L. minor* (700 мл) ($\bar{x} \pm SE, n=5$)

Послідовне стекування 6-ти одиничних 4-електродних біосистем з ряскою малою привело до зростання біоелектричного потенціалу в 6.10 раз: біоелектричний потенціал піднявся з 0.983 В до 6.001 В (рис. 3.5.13). Послідовне стекування модулів з базиліком кімнатним *O. basilicum* та солейролією гелскинею *H. soleirolii* приводило до майже пропорційного зростання біоелектричного потенціалу до кількості модулів. Так, наприклад, при стекуванні 6 модулів з базиліком кімнатним біоелектричний потенціал зростав з 1.020 мВ до 6.461 мВ, тобто в 6.33 раз. Аналогічний вплив був продемонстрований також при стекуванні електро-біосистемних модулів з декоративними рослинами *H. soleirolii*. Біосистеми з *O. basilicum* та *H. soleirolii* і ґрунтом виявилися більш ефективними, ніж біосистеми з *L. minor* та водним середовищем.

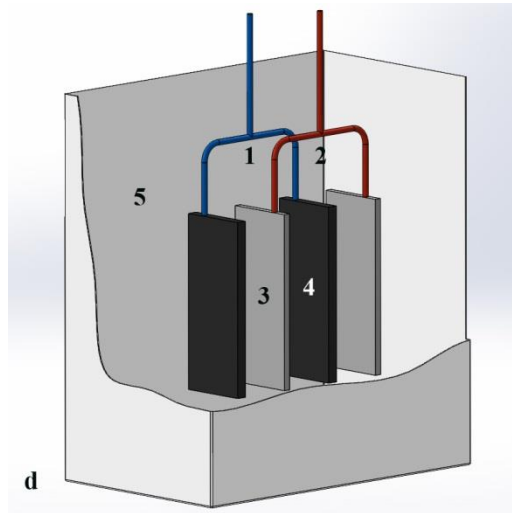


Рис. 3.5.12 Структура компактної біосистеми на основі чотирьох електродів як базова для стекування: 1 – катодна система з двох паралельно з'єднаних дротами катодів, 2 – анодна система з двох паралельно з'єднаних анодів, 3 – аноди, 4 – катоди, 5 – ґрунтовий субстрат

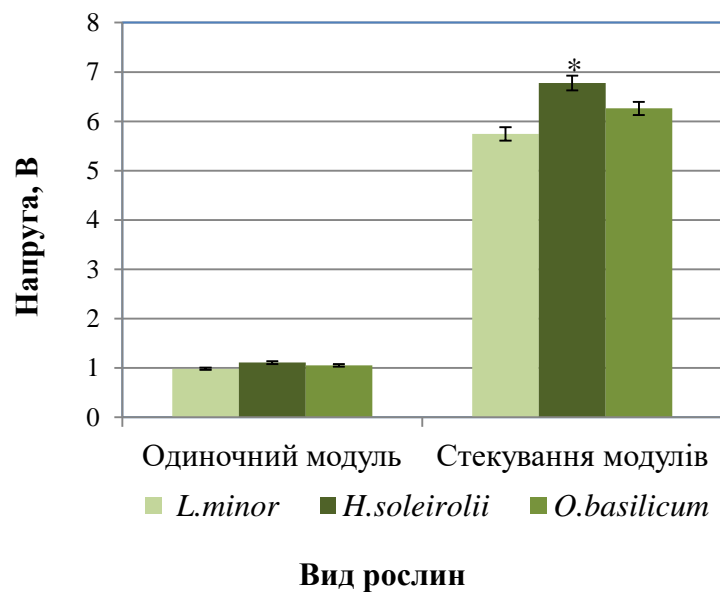


Рис. 3.5.13 Вплив виду рослин та послідовного стекування 6-ти біосистем з біоелектричні параметри ($\bar{x} \pm SE, n=10$)

Аналогічні тренди зафіксовані в роботах з ґрунтовими електро-біосистемами з рослинами при послідовному з'єднанні 3-ох біосистем, базованих на *A. africanus*, де показано ріст напруги з 0.690 В до 1.300 В (Gomora-Hernandez et al., 2020) та в нашій попередній роботі з *C. palustris*, де показано ріст потенціалу з

1.100 В до 3.230 В. Енергоефективність, пропорційну до кількості стекованих одиничних модулів мікробних електро-біосистем, та аналогічні ефекти паралельного та послідовного їх з'єднання продемонстровано в роботах з MFCs (Ieropoulos et al., 2016, Walter et al., 2018). Послідовне з'єднання не мало впливу на струм короткого замикання, який залишився на вихідному рівні, як показано також для електро-біосистем, базованих лише на мікроорганізмах (Aelterman et al., 2006) та рослинах і мікроорганізмах (Pamintuan et al., 2018).

Нарощення біоелектричних параметрів з невеликої площі рослинних вазонів може мати практичне застосування для енергоживлення приладів низького енергоспоживання. Наприклад, компактні біосистеми з рослинами: пряними рослинами базиліку *O. basilicum* або декоративними кімнатними рослинами *H. soleirolii*, сконструйовані послідовним стекуванням 3-ьох біомодулів, кожен з яких містить два паралельно з'єднаних катода та два паралельно з'єднаних аноди, характеризувалися в середньому 3.245 В OCV та 3.801 мА струму короткого замикання, що було достатнім для безперебійної роботи від 1 до 4-ьох світлодіодів чи автономного і сталого живлення цифрової кімнатної метеостанції з календарем, годинником, термометром і таймером впродовж кількох місяців експерименту (рис. 3.5.14- 3.5.17).

Одиничний біомодуль з рослинами об'ємом 0.6 л характеризувався наступними середніми біоелектричними параметрами: 1.020 В OCV та струмом короткого замикання 3.791 мА. Два послідовно з'єднані біомодулі були здатні забезпечувати роботу цифрового годинника чи цифрового термометра/гігрометра впродовж кількох місяців експерименту.

Цифрова метеостанція Bioterm є розрахованою на роботу від двох батарейок 1.5 В, які в даному досліді замінює рослинно-мікробна біоелектрика, що є максимально зібрана завдяки комбінації паралельно-послідовного підключення. Два невеликі компактні біосистемні біомодулі можуть замінити 1.5 В батарейку, необхідну для роботи цифрового годинника чи цифрового термометра/гігрометра.

Електробіосистеми можуть забезпечувати також світіння стандартних світлодіоди з напругою живлення 3В.

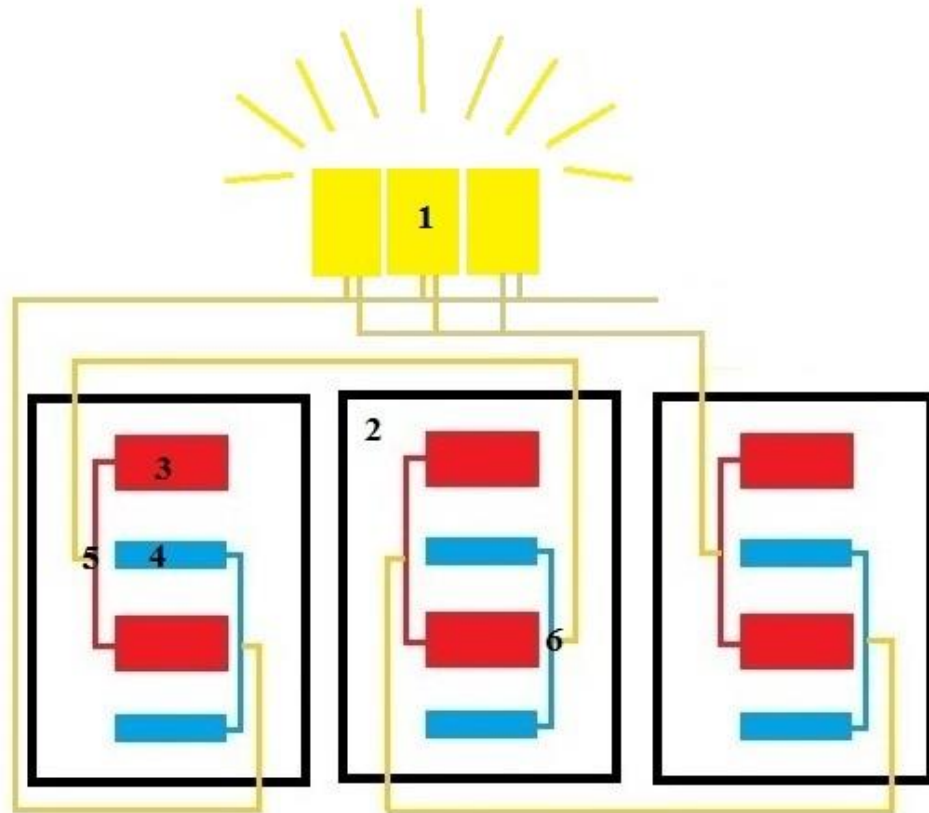


Рис. 3.5.14 Схематичне представлення компактних біосистем, сконструйованих шляхом послідовного стекування трьох чотири-електродних біомодулів, що служать автономним та сталим джерелом живлення для двох світлодіодів: 1 – світлодіоди з паралельним підключенням, 2 – субстрат для розвитку рослин та мікроорганізмів, 3 – катод, 4 – анод, 5, 6 – послідовне з’єднання паралельно з’єднаних між собою катодів із паралельно з’єднаними між собою анодів різних біомодулів

Такі джерела енергії є екологічно чистими, використовуючи зелену енергію рослин і мікроорганізмів ґрунту, для свого функціонування потребують лише природне сонячне освітлення і полив та не супроводжуються шкідливими викидами. Час їх роботи, на відміну від батарейок, є необмеженим і залежним лише від розвитку рослин, їх фотосинтезу та природної активності ризосферних мікроорганізмів. Тим самим, це дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів на

виробництво батарейок, які необхідно часто змінювати на нові та нівелювати проблему утилізації токсичних батарейок. Крім того, запропоновані біосистеми можуть експлуатувати графітові відходи тролейбусного транспорту та відпрацьоване харчове упакування соків чи молока, що надає додаткової економії ресурсів і бюджетності біосистемам. Матеріали біосистем утилізуються шляхом вторинної переробки: графіт, органічний самородний мінерал, з виготовленням товарного графіту; оцинкована сталь з отриманням $ZnCl_2$, що застосовується як біодобриво та в різних промислових галузях, і виробництвом сталі; пакети, поєднуючі папір та пластик, передбачають вторинну переробку або використання як паливо для цементних заводів чи котелень.



Рис. 3.5.15 Компактна біосистема з *H. soleirolii*, сконструйована шляхом послідовного з'єднання трьох модулів, служить автономним та сталим джерелом живлення для трьох світлодіодів, забезпечуючи підсвітку протягом декількох місяців експерименту

Використання стекування рослинно-мікробних біосистем представлено в небагаточисельних роботах, включаючи досить масивні громіздкі конструкції.

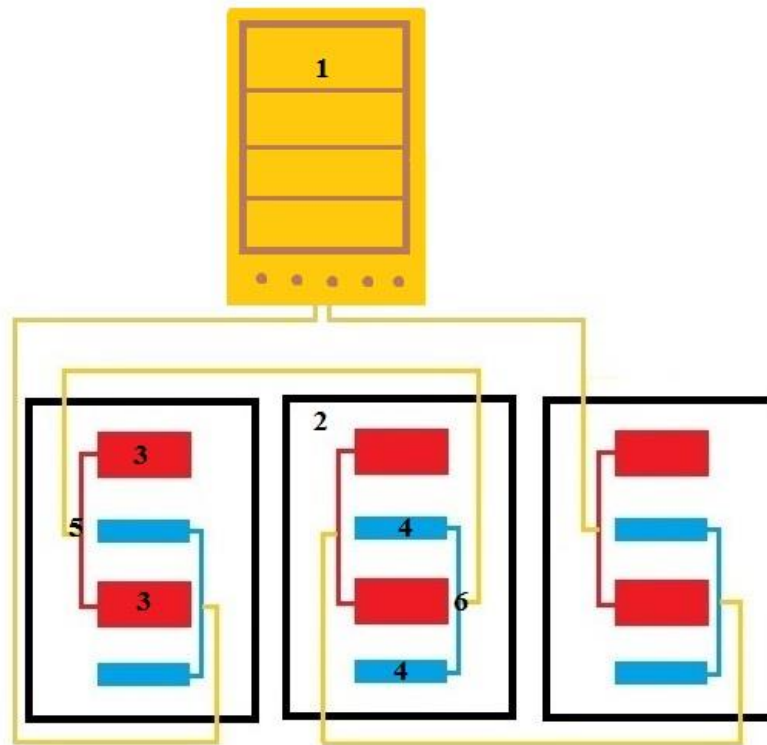


Рис. 3.5.16 Схематичне представлення компактної біосистеми з базиліком кімнатним, сконструйованої шляхом послідовного стекування трьох чотири електродних біомодулів з паралельним з'єднанням катодів і паралельним з'єднанням анодів: 1 – світлодіод, 2 – субстрат для розвитку рослин та мікроорганізмів, 3 – катод, 4 – анод, 5,6 – послідовне з'єднання паралельно з'єднаних між собою катодів із паралельно з'єднаними між собою анодів різних біомодулів

Наприклад, десять послідовно з'єднаних біомодулів Moss-PMFC заряджали одну акумуляторну батарею з номінальною напругою 3.6 В (Bombelli et al., 2016).. Три послідовно з'єднані горщики об'ємом кілька літрів кожен з *A. africanus*-PMFC забезпечували лише 1.3 В та частково заряджали 7 В та 1500 мА·h акумулятор мобільного телефону протягом 24 годин до 3.7 В (Gomora-Hernandez et al., 2020). Дванадцять громіздких PMFC реакторів висотою 32 см були з'єднані послідовно, щоб забезпечити 3В і живлення одного цифрового годинника та LED

(Apollon et al., 2021). Розроблені нами компактні електро-біосистеми включають лише два або три біомодулі, які є компактні об'ємом, 0.6 л та висотою 12 см, проте при цьому дозволяють роботу приладів в реальному часі забезпечуючи в середньому 3.3 В (три біомодулі) та використовуючи при цьому прості бюджетні електродні матеріали та середовища на відміну від коштовних платинових, вуглецевих тканинних матеріалів та спеціальних середовищ, представлених в інших роботах (табл. 3.5.2).



Рис. 3.5.17 Компактна біосистема з базиліком кімнатним, сконструйована шляхом послідовного з'єднання трьох біомодулів, служить автономним та сталим джерелом живлення протягом декількох місяців експерименту для цифрової метеостанції, що включає годинник-календар-термометр-таймер

Отже, запропоновано біосистемний біомодуль, що містить чотири-електродну систему, утворену шляхом паралельного з'єднання двох катодів та паралельного з'єднання двох анодів на міжелектродній відстані 1 см з середніми характеристиками відкритого кола 1.020 В та струмом короткого замикання 3.791 мА. Такий біомодуль є більш економічно вигідний, ніж восьми-електродний для

даного об'єму біосистеми, оскільки при 2 рази нижчих затратах на електродні матеріали та дроти демонстрував лише в 1.2 раз нижчі біоелектричні параметри та при цьому досить високі значення біоелектрики. Біомодуль є компактним та використовує бюджетні матеріали як для електродів, контейнера та дротів, так і для біологічного компонента в якості широко поширених бюджетних видів рослин. Біомодуль з висадженими рослинами може слугувати як субодинаця для стекування, в результаті чого два біомодулі можуть забезпечувати роботу цифрового годинника або цифрового термометра/гігрометра, а три біомодулі – роботу цифрової метеостанції з календарем, годинником, термометром та таймером чи освітлення до чотирьох світлодіодів протягом декількох місяці експерименту.

Порівняльна характеристика біосистем, розроблених нещодавно у світі, з представленими в роботі

Число біомодулів	U, V	Параметр и біомодуля, см	Електроди	Рослина	Середовище	Нещодавні публікації
1	0.856	45x30x35	Карбонові щітки, Нержавіюча сталь	<i>A. viridis</i> , <i>T. aestivum</i>	грунт	Arulmani et al., 2021
3	3.245	12x9.5x5.5	Графіт (відходи), Zn-сталь	<i>O. basilicum</i> , <i>H. soleirolii</i>	грунт	Ця робота
3	1.300	24.5x28x20	Карбоно-волокнистий текстиль	<i>A. africanus</i>	грунт	Gomora-Hernandez et al., 2020
3	0.600	45x45x30	Графітові палички	<i>I. aquatica</i> , <i>P. sratiototes</i>	грунт	Pamintuan et al., 2020
10	3.600	11x7.5x5	Pt-Карбоновий папір, нержавіюча сталь	<i>мохи</i>	BCD	Bombelli et al., 2016
12	3.000	32x5x1	Цинковий лист, графітовий фетр	<i>Opuntia species</i>	грунт	Apollon et al., 2021

Використання кількох електродів в одному біомодулі та послідовне з'єднання біомодулів є важливим кроком для підвищення їх біоелектропродуктивності. Стекування шляхом послідовного з'єднання компактних і бюджетних біомодулів дозволяє досягнути майже пропорційного зростання напруги та забезпечує можливість використання як сталого та самопідтримуючого і дешевого джерела енергії для роботи приладів низького енергоспоживання. Конструювання мультиелектродних біосистем та їх послідовне з'єднання є перспективним способом подолання проблеми низької потужності, способом підвищення їх біоелектричних параметрів та вагомим кроком до широкомасштабного впровадження рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики.

Важливим є вибір рослини для біосистеми як двигуна генерації біоелектрики. Ймовірно, рослинний компонент розробленої нами біосистеми *H. soleirolii* відрізнявся вищими значеннями біоелектрики як рослина з розвинутою наземною біомасою та кореневою системою. В роботах інших авторів біокомпонентами слугували низькорослі мохи і сукуленти *Opuntia* та водяний салат *P. sratiototes*, рослини з слабо розвинутою кореневою системою щиріці зеленої *A. viridis* та водяного шпинату *I. aquatica* чи ризоїдами мохів.

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександру Медведєву за консультації і студентам-екологам Володимирі Воронько, Ігорю Селецькому, Назару Стемпіцькому за технічну допомогу в експериментах та конструюванні систем збору біоелектрики.

Висновки до розділу 3

Розроблено спосіб прямого отримання рослинно-мікробної біоелектрики з ґрунту за допомогою нової пари бюджетних, стійких у зовнішньому середовищі

графітових та перфорованих оцинковано-стальних електродів та мідних дротів з полівінілхлоридною ізоляцією. Розроблену ефективну структуру біосистеми. Показано позитивний вплив збільшення площі електродів та скорочення міжелектродної відстані на величини отримуваної біоелектрики в біосистемі, що виявлявся в різній мірі при різних застосовуваних опорах. Сконструйовано ефективні багатоелектродні системи для отримання біоелектрики в контейнерах з висадженими рослинами. Вивчено вплив виду рослин та стекування біомодулів для підвищення ефективності біосистем. При послідовному з'єднанні трьох та шести багатоелектродних біосистем напруга зростала в 2.9 – 6.3 раз. При паралельному з'єднанні двох багатоелектродних біосистем сила струму зростала в 2.1 рази. Збільшення площі електродів одного біомодуля в 10 разів призводить до збільшення питомої потужності при 200 Ом в 3.95 раз. Біосистеми на основі *H. soleirolii* були більш найбільш ефективними. Вперше досягнуто прогресу в компактності у розмірах та кількості біомодулів біосистем при збереженні виходу біоелектрики. Дво- і три-модульні 0.6 л багатоелектродні біосистеми, базовані на прямих чи декоративних рослинах *O. basilicum* і *H. soleirolii* служили автономним та екологічно чистим джерелом живлення в режимі реального часу для кімнатної метеостанції, цифрового годинника, цифрового термометра/гігрометра та світлодіодів заміняючи батарейки 1.5В та 3В. Складне паралельно-послідовне з'єднання багатоелектродних біосистем та редукування міжелектродної відстані відкриває перспективи подальшої максимізації отримання рослинно-мікробної біоелектрики шляхом комбінування різних схем підключення та конфігурацій багатоелектродних систем як енергетичних паливних субчастинок в одну комплексну мультиелектродну біосистему.

Матеріали розділу представлені в патентах та наступних публікаціях:

Rusyn I.B., Medvediev O.V., & Valko B.T. (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323–1334. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02934-3> **Scopus, Q2**

- Русин, І.Б.,** Медведєв, О.В., & Дячок, В.В. (2021). Конструювання мультиелектродних електро-біосистем з *L. minor*. *Екологічні науки*, 39, 103-105. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.16>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**
- Русин, І.Б.,** & Дячок, В.В. (2021). Роль перемішування субстрату для ефективності водних електро-біосистем. *Екологічні науки*, 38, 29-31. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.5-38.6>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**
- Русин І.Б.,** & Дячок В.В. (2021). Залежність біоелектричних параметрів електро-біосистем від площі електродів. *Екологічні науки*, 37, 162-165. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.24> **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**
- Русин І.Б.,** Медведєв О.В., & Дячок В.В. (2021). Вплив міжелектродної відстані на біоелектричні показники електро-біосистем. *Екологічні науки*, 36, 123-126. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.19> **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**
- Rusyn, I.,** & Djachok, V. (2021). Effect *Lemna minor* population density on bioelectric parameters of electro-biosystems. *Environmental problems*, 6(4), 6 (4), 195-200. <https://doi.org/10.23939/ep2021.04.195>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**

Література до розділу 3

- Allen, E. 2015. Biogas production from novel substrates. PhD Thesis, University College Cork, Cork, Ireland.
- Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H. T., Boon, N., & Verstraete, W. (2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 40(10), 3388–3394. doi: 10.1021/es0525511
- Apollon, W., Luna-Maldonado, A.I., Kamaraj, S.K., Vidales-Contreras, J.A., Rodriguez-Fuentes, H., Gómez-Leyva, J.F., & Aranda-Ruiz, J. (2021). Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review. *Biomass & Bioenergy*, 148, 106028. doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106028
- Arends, J. B., Speeckaert, J., Blondeel, E., De Vrieze, J., Boeckx, P., Verstraete, W., Rabaey, K., & Boon, N. (2014). Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 3205–3217. doi: 10.1007/s00253-013-5328-5
- Arulmani, S.R.B. Gnanamuthu, H.L. Kandasamy S., Govindarajan, G. Alsehli, M. Elfasakhany, A. Pugazhendhi, & A. Zhang, H. (2021). Sustainable bioelectricity production from *Amaranthus viridis* and *Triticum aestivum* mediated plant microbial fuel cells with efficient electrogenic bacteria selections. *Process Biochem*, 107, 27-37. doi: 10.1016/j.procbio.2021.04.015
- Ayala-Ruiz, D., Atoche, A. C., Ruiz-Ibarra, E., de la Rosa, E. O., & Castillo, J. V. (2019). A Self-Powered PMFC-Based Wireless Sensor Node for Smart City Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8986302, 10. doi: 10.1155/2019/8986302

- Azri, Y. M., Tou, I., Sadi, M., & Benhabyles, L. (2018). Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*, 15(4), 254–263. doi: 10.1080/15435075.2018.1432487
- Behera, B. K., & Varma, A. (2016). *Microbial Resources for Sustainable Energy*. Springer International Publishing, Switzerland.
- Bombelli, P., Iyer, D. M. R., Covshoff, S., McCormick, A. J., Yunus, K., Hibberd, J. M., Fisher, A. C., & Howe, C. J. (2013). Comparison of power output by rice (*Oryza sativa*) and an associated weed (*Echinochloa glabrescens*) in vascular plant bio-photovoltaic (VP-BPV) systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97, 429–438. doi: 10.1007/s00253-012-4473-6
- Bombelli, P., Dennis, R. J., Felder, F., Cooper, M. B., Iyer, D. M. R., Royles, J., Harrison, S. T, Smith, A. G, Harrison, C. J., & Howe, C. J. (2016). Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society Open Science*, 3, 160249. doi: 10.1098/rsos.160249
- Brunelli, D., Rossi, M., & Tosato, P. (2017). A Radio-Triggered Wireless Sensor Platform Powered by Soil Bacteria. *Proceedings*, 1(568), 1–4. doi: 10.3390/proceedings1040568
- Cervantes-Alcala, R., Arrocha-Arcos, A. A., Peralta-Pelaez, L. A., & Ortega-Clemente, L. A. (2012). Electricity generation in sediment plant microbial fuel cells (SPMFC) in warm climates using *Typha domingensis* Pers. *International Research Journal of Biotechnology*, 3(9),166–173.
- Ceschin, S., Crescenzi, M., & Iannelli, M.A. (2020). Phytoremediation potential of the duckweeds *Lemna minuta* and *Lemna minor* to remove nutrients from treated waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 15806–15814. doi: 10.1007/s11356-020-08045-3
- Ceschin S., Abati S., Ellwood N.T.W., & Zuccarello V. (2018). Riding invasion waves: spatial and temporal patterns of the invasive *Lemna minuta* from its arrival to its

- spread across Europe. *Aquatic Botany* 150, 1–8. doi: 10.1016/j.aquabot.2018.06.002
- Cheng, J., Landesman, L., Bergmann, B. A., Classen, J. J., Howard, J. W., & Yamamoto Y. T. (2002). Nutrient removal from swine lagoon liquid by *Lemna minor* 8627. *Trans ASAE*, 45, 1003–1010.
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, 40, 2426–2432. doi: 10.1021/es051652w
- Cheng, T. H., Ching, K. B., Uttraphan, C., & Heong, Y. M. (2020). Electrical energy production from plant biomass: an analysis model development for pandanus amaryllifolius plant microbial fuel cell. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(3), 1163–1171. doi: 10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1163-1171
- Chiranjeevi, P., Mohanakrishna, G., & Mohan, S.V. (2012). Rhizosphere mediated electrogenesis with the function of anode placement for harnessing bioenergy through CO₂ sequestration. *Bioresour Technology*, 124, 364–370. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.020
- Crow, P. (2005). The influence of soils and species on tree root depth. Forestry Commission, Edinburgh.
- Dai, J., Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- de la Rosa, E. O. , Castillo, J. V., Campos, M. C., Pool, G. R. B., Nunez, G. B., Atoche, A. C., & Ortegon, J. (2019). Aguilar Plant Microbial Fuel Cells – Based Energy Harvester System for Self-powered IoT Applications. *Sensors*, 19(1378), 1–16. doi: 10.3390/s19061378
- De Schampelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from

- rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- Eshel, A., & Beeckman, T. (2013). *Plant Roots: The Hidden Half*, Fourth Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Gomora-Hernandez, J. C., Serment-Guerrero, J. H., Carreno-de-Leon, M. C., & Flores-Alamo, N. (2020). Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 227–237. doi: 10.24275/rmiq/IA542
- Gubanov, I. A., Kiseleva, K. V., Novikov, V. S., & Tikhomirov, V. N. (2002). *Lemna minor* L. - Ryaska malenkaya [*Lemna minor* L. – Duckweed small]. In: Gubanov, I. A. et al. *Illyustrirovannyi opredelitel rasteniy Sredney Rossii* [Illustrated determinant to plants of Middle Russia], Vol 1, Paporotniki, khvoshchi, plauny, golosemennyye, pokrytosemennyye (odnodolnyye) [Ferns, horsetails, moss, gymnosperms, angiosperms (monocotyledons)], 409, Moskva, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, Institut tekhnologicheskikh issledovaniy [in Russian].
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., & Sheng, G. P. (2016). Bioelectrochemical chromium (VI) removal in plant-microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 50, 3882–3889. doi: 10.1021/acs.est.5b06376
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, 5, 70. doi: 10.1186/1754-6834-5-70
- Helder, M., Chen, W. S., Van Der Harst, E. J. M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Buisman, C. J. N., & Potting, J. (2013a). Electricity production with living

- plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 7, 52–64. doi: 10.1002/bbb.1373
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2012). Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 87, 185–191. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008
- Ieropoulos, I. A., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., Sanchez-Herranz, D., & Greenman, J. (2016). Pee power urinal – microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation. *Environmental Science: Water Research Technology* 2, 336–343. doi: 10.1039/C5EW00270B
- Iqbal J., Javed A., & Baig M. A. (2019). Growth and nutrient removal efficiency of duckweed (*Lemna minor*) from synthetic and dumpsite leachate under artificial and natural conditions. *PLoS One* 14(8), e0221755. doi: 10.1371/journal.pone.0221755
- Jung, S. P., & Pandit, S. (2019). Important Factors Influencing Microbial Fuel Cell Performance. In: S. Venkata Mohan, S. Varjani, & A. Pandey (Eds.) *Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals & Remediation*. Biomass, Biofuels, Biochemicals, 377–406. Elsevier, Amsterdam. doi: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00015-7
- Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110 (C), 402–414. doi:10.1016/j.rser.2019.05.016
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Kalathil, S, Patil, S. A., & Pant, D. (2017). Microbial Fuel Cells: Electrode materials. In: Wandelt, K. and Vadgama, P. (eds) *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface science and Electrochemistry*. Elsevier, Amsterdam. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.13459-6

- Klaisongkram, N., & Holasut, K. (2015). Electricity Generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using *Cyperus involucratus* R. *Engineering and Applied Science Research*, 42(1), 117–124. doi: 10.14456/kkuenj.2015.2
- Kouzuma, A., Kasai, T., Nakagawa, G., Yamamuro, A., Abe, T., & Watanabe, K. (2013). Comparative metagenomics of anode-associated microbiomes developed in rice paddy-field microbial fuel cells. *PLOS One*, 8 (11), e77443. doi: 10.1371/journal.pone.0077443
- Liang, Y., Feng, H., Shen, D., Li, N., Guo, K., Zhou, Y., Xu, J., Chen, W., Jia, Y., & Huang, B. (2017). Enhancement of Anodic Biofilm Formation and Current Output in Microbial Fuel Cells by Composite Modifications of StainlessSteel Electrodes. *Journal Power Sources*, 342, 98–104. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.020
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, 172010, 1–10. doi: 10.1155/2013/172010
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 195, 115–121. doi: 10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Moqsud, M. A., Yoshitake, J., Bushra, Q. S., Hyodo, M., Omine, K., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, 36, 63–69. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.004
- Ndjebayi, J. N. (2017). Aluminum Production Costs: A Comparative Case Study of Production Strategy. Dissertation, Walden University.
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81–89. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.064
- Oh, S.-E., & Logan, B. E. (2006). Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 70, 162–169. doi: 10.1007/s00253-005-0066-y
- Oodally, A., Gulamhussein, M., & Randall, D. G. (2019). Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African

- wetland plants. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100930, 1–8. doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100930
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, 186, 270–275. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.014
- Pamintuan, K. R. S., Clomera, J. A. A., Garcia, K. V., Ravara, G. R., & Salamat, E. J. G. (2018). Stacking of aquatic plant-microbial fuel cells growing water spinach (*Ipomoea aquatica*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). In: IOP Conference Series: Earth & Environmental Science, 191, 012054. The 4th International Conference on Water Resource & Environment (WRE 2018) 17–21 July 2018, Kaohsiung City, Taiwan. IOP Publishing, Kaohsiung City. doi: 10.1088/1755-1315/191/1/012054
- Pamintuan, K. R. S., Reyes, C. S. A., & Lat, D. K. O. (2020). Compartmentalization and polarization studies of a Plant-Microbial Fuel Cell assembly with *Cynodon dactylon*. *E3S Web of Conferences*, 181, 01007. doi: 10.1051/e3sconf/202018101007
- Potter, M. C. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 84, 260–267. doi: 10.1098/rspb.1911.0073
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnology*, 23, 291–298. doi: 10.1016/j.tibtech.2005.04.008
- Reboul, M. C., & Baroux, B. (2011). Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys. *Materials and Corrosion*, 62(3), 215–233. doi: 10.1002/maco.201005650
- Ren, H., Lee, H.-S., & Chae, J. (2012). Miniaturizing microbial fuel cells for potential portable power sources: promises and challenges. *Microfluidics & Nanofluidics*, 13, 353e381. doi: 10.1007/s10404-012-0986-7

- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2015) Sposib priamoho otrymannia bioelektryky z gruntu [The method of obtaining bioelectricity from the ground]. Patent of Ukraine 98393, filed November 17, 2014, issued April 27, 2015 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2016). Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybyunnykh shariv gruntu [Biological method of producing bioelectricity from deep soil layers]. Patent of Ukraine 112093, filed March 9, 2016, issued December 12, 2016 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymannia bioelektryky iz konteineru z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodiv [The method for bioelectricity obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).
- Sangeetha, T., & Muthukumar, M. (2013). Influence of electrode material and electrode distance on bioelectricity production from sago-processing wastewater using microbial fuel cell. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 32 (2), 390–395. doi: 10.1002/ep.11603
- Sarma, P. J. & Mohanty, K. (2018). *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. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 404–410. doi: 10.1016/j.jbiosc.2018.03.00
- Sawyer, N., Trois, C., Workneh, T. S., & Okudoh, V. (2019). An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(2), 105–115. doi: 10.32479/ijeep.7375
- Sleutels, T. H. J. A., Hamelers, H. V. M., Rozendal, R. A., & Buisman, C. J. N. (2009). Ion transport resistance in microbial electrolysis cells with anion and cation exchange membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 3612–3620. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.004
- Sophia, A. C., & Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 59–66. doi: 10.1016/j.seta.2017.05.001

- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. doi: 10.1002/er.1397
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, 74, 1271–1273. doi: 10.1271/bbb.90852
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2018). A New Method for Sensing Soil Water Content in Green Roofs Using Plant Microbial Fuel Cells. *Sensors*, 18, 71. doi: 10.3390/s18010071
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 86(3), 973–981. doi: 10.1007/s00253-010-2440-7
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schlöter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 94(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2013). Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass & Bioenergy*, 51, 60–67. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.01.002
- Tou, I., Azri, Y. M., Sadi, M. H., Lounici, H., & Kebbouche-Gana, S. (2019). *Chlorophytum* microbial fuel cell characterization. *International Journal of Green Energy*, 1–13. doi: 10.1080/15435075.2019.1650049
- Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2016). Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel

- Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 06(01),10–15. doi: 10.4236/jsbs.2016.61002
- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., & Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresour Technol*, 102, 7036–7042. doi: 10.1016/j.biortech.2011.04.033
- Walter, X. A., Gajda, I., Forbes, S., Winfield, J., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2016). Scaling-up of a novel, simplified MFC stack based on a self-stratifying urine column. *Biotechnology Biofuels*, 9(93), 1–11. doi: 10.1186/s13068-016-0504-3
- Walter, X. A., Merino-Jimenez, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2018). PEE POWER[®] urinal II – Urinal scale-up with microbial fuel cell scale-down for improved lighting. *Journal of Power Sources*, 15(392), 150–158. doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.047
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137, 151–157. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.006
- Yan, Z., Jiang, H., Cai H., Zhou, Y., & Krumholz, L. R. (2015). Complex interactions between the macrophyte *Acorus calamus* and microbial fuel cells during pyrene and benzo[a] pyrene degradation in sediments. *Scientific Reports*, 5, 10709. doi: 10.1038/srep10709
- Yan, D., Song, X., Weng, B., Yu, Z., Bi W., & Wang, J. (2018). Bioelectricity generation from air-cathode microbial fuel cell connected to constructed wetland. *Water Science & Technology*, 78(9), 1990–1996. doi: 10.2166/wst.2018.471
- Yang, Y., Yan, L., Songa, J., & Xu, M. (2018). Optimizing the electrode surface area of sediment microbial fuel cells. *RSC Adv.* 8, 25319. doi: 10.1039/c8ra05069d
- Ziegler, P., Adelman, K., Zimmer, S., Schmidt, C., & Appenroth, K. J. (2014). Relative in vitro growth rates of duckweeds (Lemnaceae) – the most rapidly growing higher plants. *Plant Biol* 17, 33–41. doi: 10.1111/plb.12184
- Zinchenko, O. I., Salatenko, V. N., & Bilonozhko, M. A. (2001). Roslynnystvo. [Plant Growing]. Ahrarna osvita, Kyiv (in Ukrainian).

Розділ 4. Оцінка біоелектропродуктивності природних екосистем *in situ*

4.1 Біоелектрика екосистем лісів, заболочених територій та агроекосистем

Екосистеми прикордоння України та Польщі в своїй більшості представлені мозаїкою лісів, земель сільськогосподарського призначення та заболочених територій, що простягаються на сотні гектарів. Крім безпосереднього еколого-географічного, кліматичного, геологічного, рекреаційного та сільськогосподарського значення, екосистеми лісів, землі сільськогосподарського призначення та заболочені території можуть слугувати екологічним джерелом біоелектрики без нанесення будь-якої шкоди екосистемам, що властиво традиційним джерелам енергетики. Суть альтернативного методу отримання біоелектрики, що активно розвивається в останнє десятиліття, полягає у внесенні електродних систем у товщу ґрунту, де розвиваються рослини (De Schamphelair et al. 2008; Kaku et al. 2008; Strik et al., 2008). Електроди збирають біоелектрику, продукovanу ґрунтовими електрогенеруючими мікроорганізмами, що живляться корневими продуктами фотосинтезу рослин та продуктами розкладу листяного опаду (Strik et al., 2008; Timmers et al., 2012; Nitisoravut and Regmi, 2017). В утворенні біоелектрики важливу роль відіграють протони, які виділяються мікроорганізмами в результаті розкладу органічних сполук, так і внаслідок дисоціації вугільної кислоти, утвореної з CO₂ (Strik et al., 2008). Вуглекислий газ виділяється у великих кількостях коренями у ґрунт в процесі дихання рослин та в процесі метаболізму ґрунтових мікроорганізмів (Strik et al., 2008).

На теперішньому етапі розвитку біоелектротехнологій досягнуто їх застосування для низько енергоємких потреб: живлення екологічних польових датчиків (Tender et al., 2008; Zhang et al., 2011) та LED освітлення територій (Schultz, 2014; Lu et al., 2015). Біоелектротехнологічні установки, встановлені в лісах та заболочених територіях прикордонних територій, мають перспективи використання для живлення польових автономних систем моніторингу за

екосистемами, для влаштування бездротових станцій зеленого туризму в природних парках з можливістю підзарядки приладів. Біоелектротехнології, вмонтовані в землях сільськогосподарського призначення можуть жити автономні системи поливу та датчики вологості ґрунту, інноваційні системи моніторингу за складом ґрунту та ростом рослин в рамках розумного господарства. За розрахунками голандських науковців теоретичним максимумом рослинно-мікробної електробіотехнології є повне енергозабезпечення цілих оселищ, який можна буде досягнути за умови вдосконалення технології (Strik et al., 2011; Wetser, 2016).

Ліси та заболочені території змогли би стати додатковим екологічно чистим джерелом енергії, як масштабного, так і локального значення. Біоелектротехнологія особливо актуальна для Волинської області, заболочені території якої займають найбільшу частку серед усіх областей України (10.3 %) (табл. 4.1.1) та для північних низовинних територій Полісся та гірських територій Бескид України та Польщі, де частка лісів є досить значною, та займає від 40.0% до 90.0% всієї території (Fedoniuk et al., 2005; Піна, 2007) (табл. 4.1.2), а підведення ліній електропередач до цих територій є проблематичним, супроводжується значними фінансовими затратами та руйнуванням лісу.

Землі сільсько-господарського призначення, які становлять особливо велику частку в Центральних регіонах прикордоння Польщі та України (Мале Полісся, Поділ, Височина Любельська, Західне та Середнє Розточчя, Височина Волинська), і, подекуди, охоплюють більшість її території, могли би використовуватися як джерело біоелектрики. Використання орних земель для енергопотреб мали б короткочасний характер, пов'язаний з терміном вирощування культур та перекопуванням ґрунту. І, натомість, сільськогосподарські сади, сіножаті та пасовища, приватні сади в оселищах, частка яких досить значна у земельному фонді сільсько-господарського призначення (табл. 4.1.3), можуть експлуатуватися

круглорічно як джерело зеленої електрики.

Таблиця 4.1.1 Поширення болотних масивів на заході України (за Ivchenko, 2007 та за даними Державного агентства лісових ресурсів України, 2016)

Область	Болота, тис.га	Заболоченні землі, тис. га		Заболочення територій в % від загальної площі області
		сінокоси і пасовища	ліси і кущі	
Волинська	85.0	39.1	83.7	10.3
Закарпатська	1.4	1.8	–	0.3
Івано-Франківська	2.2	31.3	1.3	2.5
Львівська	1.9	25.5	28.5	2.6
Рівненська	75.5	74.5	16.0	8.3
Тернопільська	6.3	14.2	–	1.5
Чернівецька	1.5	4.2	–	0.7

Таблиця 4.1.2 Лісові масиви на заходні України (за даними Державного агентства лісових ресурсів України, 2016 та Varvinskyi & Tykhenko, 2015).

Область	Площа лісових ділянок, вкритих лісовою рослинністю, тис. га	Лісистість в % від загальної площі області
Волинська	624.6	31.0
Закарпатська	656.7	51.4
Івано-Франківська	571.0	41.0
Львівська	621.2	28.5
Рівненська	729.3	36.4
Тернопільська	183.2	13.3
Чернівецька	236.7	29.2

Таблиця 4.1.3 Землі сільськогосподарського призначення на заході України (за даними Barvinskyi & Tykhenko, 2015).

Область	Площа земель сільсько-господарського призначення, тис.га				Площа сільсько-господарських земель в % від загальної площі області	Площа сіножатей, пасовищ та садів в % від загальної площі області
	орні землі	сіножаті	пасовища	сади		
Волинська	685.9	160.7	214.3	10.7	53.2	19.2
Закарпатська	192.3	96.1	137.3	32.0	35.9	20.8
Івано-Франківська	417.3	77.0	128.4	19.3	46.1	16.1
Львівська	876.1	156.9	248.5	26.2	58.9	19.8
Рівненська	671.9	123.0	132.5	18.9	47.2	13.7
Тернопільська	891.8	31.9	127.4	10.6	76.8	12.3
Чернівецька	346.2	43.3	62.5	28.9	59.4	16.6

Частка лісів, орних земель та заболочених територій відрізняється в кожному регіоні, проте займає вагому частку в земельному фонді кожної області і є актуальною як можливе джерело біоелектрики для кожного регіону (табл. 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3). Найбільша частка лісів зосереджена на північних низовинах та у південній гірській частині прикордонних територій. В окремих районах Бескид ялинові та букові ліси займають до 90% їх території (Fedoniuk et al., 2005). В Західному Поліссі, в окремих повітах, соснові та сосново-дубові ліси займають до 40.0–50.0 %, орні землі 15.1–28.6% (Fedoniuk et al., 2005). В Малому Поліссі дубово-соснові ліси займають ¼ всієї території, а сільсько-господарські угіддя біля 66.0% (Fedoniuk et al., 2005). Східне Розточчя включає великий комплекс букових лісів Яворівського Природного Парку. В північно-східних гірських

регіонах Сандомирщини на частку лісів припадає від 1/3 території до 66.8%, в а південно-східній 22.3% – 26.7% (Fedoniuk et al., 2005). На Подолі ліси, що представлені в основному дібровами, складають біля 25.0% (Fedoniuk et al., 2005). Сільсько-господарські поля займають велику частку, біля 70.0%, у Височині Лубельській, Західному та Середньому Розточчі, Височині Волинській, а частка лісів в даних територіях невелика та складає біля 10.0% (Fedoniuk et al., 2005). В Західному Розточчі невелике заліснення створене буковими, ялиновими, сосновими та змішаними лісами, у Волинській Височині – дубовими. Лідером по кількості заболочених територій в Україні є Полісся, до прикордонної території якого належить Волинська область. Заболочені території в цьому регіоні простягаються на десятки тисяч га: 1523 болота та заболочені сінокоси та пасовища, що займають площу понад 114,5 тис. га (Piina, 2007) та 83,7 тис. га заболочених лісів (Hryhora et al, 2005; Ivchenko, 2007) (табл. 4.1.1). Екосистеми боліт та торфовищ домінують у ландшафті Поліського Національного парку, що простягається на 9.76 тис. га з польської сторони кордону.

Численні роботи вчених всього світу (De Schamphelaire et al., 2008; Liu et al., 2013; Lu et al., 2015; Wetser et al., 2015) показують вагомі перспективи боліт і вологих луків як важливого джерела біологічної енергії. Причиною цього є те, що заболочені умови створюють оптимальні умови для збору ґрунтової біоелектрики (Lovley et al., 2011; Helder et al., 2012). Низький вміст кисню в болотистих субстратах зменшує втрати акумульованої біоелектрики. В цьому випадку генеровані мікроорганізмами протони та електрони, працюють на виробництво енергії, а не відновлення кисневмісних сполук. Проте, часто експерименти проводяться із модельними лабораторними болотними системами (lab-wetlands systems). Досліджень отримання біоелектрики *in situ* є небагато. Перші дослідження електро-продуктивності безпосередньо в рисових заболоченнях Японії було проведено Кaku et al. в 2008 та Takanezawa et al. у 2010 році та продовжено *in situ* в експериментах на рисових полях Японії та Індонезії (Kouzuma et al., 2014; Ueoka et al. 2016; Sudirjo et al., 2019), а також в заболочених лісах Південної Кароліни, США *in situ* (Dai et. al., 2015). В тому числі залишається

недослідженим потенціал та перспективи електро-продуктивності екосистем заболочених луків у східно-європейських кліматичних умовах. Використання незаболочених територій: сільськогосподарських угідь та лісів як джерела рослинно-мікробної енергії є малодослідженим і відтак представляє значний інтерес. Тому високо актуальним є завдання оцінити *in situ* рівень біоелектро-продуктивності численно представлених в прикордонні Польщі/України незаболочених екосистем лісових масивів, земель сільсько-господарського призначення, а також, болотистих територій, та перспективи їх використання як джерела зеленої енергії. Дослідження природних екосистем лісів і луків, агроекосистем як важливого місця отримання біоелектрики, має великий інтерес як малодосліджене у світі та високозатребуване через їх значну масштабну частку, представлену у багатьох країн світу.

Експерименти проведені *in situ* у різних частинах на заході України Поліській, Подільській та на межі Покутсько-Буковинських Карпат і Чорногори частини україно-польського прикордоння з використанням біосистем 32ох видів найбільш поширених видів рослин впродовж 150ти днів показали високі значення отримуваної біоелектрики у лісових масивах, заболочених луках та садових територіях і дещо нижчі в городніх землях оселищ. Середній рівень напруги в екосистемах лісів становив 1080.5 ± 25.1 мВ, в екосистемах садів – 1055.3 ± 33.9 мВ, заболочених лук – 1051.2 ± 31.5 мВ та агрокультур – 974.4 ± 27.4 мВ (рис. 4.1.1).

Поясненням зафіксованих саме в лісових зразках одних з найвищих показників біоелектрики ґрунту може бути велика кількість факторів, основними на нашу думку є наступні. Лісові рослинно-мікробні асоціації є стабільними, сформованими та існуючими непорушно протягом багатьох років. В лісах відсутнє щорічне перекопування, притаманне землям сільсько-господарського призначення, що руйнує рослинно-мікробні зв'язки. Істотний розмір лісових дерев, що сягають багато метрів у висоту, їх велика фотосинтетична поверхня, і, відповідно цього є більша кількості поживних речовин, яку вони можуть

віддавати через коріння в навколишнє середовище, ніж менші за розміром рослини.

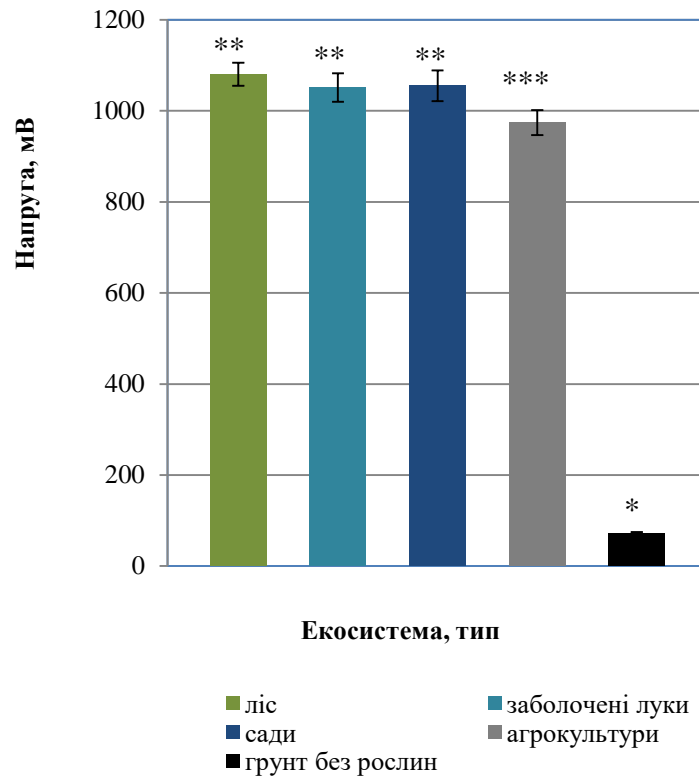


Рис. 4.1.1 Біоелектрика рослинно-мікробних біосистем в екосистемах лісів, заболочених луків, фруктових садів, агрокультур та ґрунту без рослин як контролю впродовж 150 днів спостережень протягом червня-жовтня 2014 р. ($x \pm SE, n=50$).

*Біоелектричний потенціал ґрунту без рослин суттєво відрізняється в порівнянні з всіма рослинними екосистемами ($P < 0.05$).

**Нема статистично суттєвої різниці між біоелектричними параметрами екосистем лісу та заболочених луків, фруктових садів ($P > 0.05$).

***Різниця між біоелектричними параметрами фітомікробіоценозів агрокультур та екосистем лісу є статистично істотною ($P < 0.05$).

Поверхневі кореневі системи лісових дерев, локалізовані до 30 – 60 см від поверхні, є потужно розвиненими (Dobson, 1995; Crow, 2005; Eshel & Beekman, 2013). Загальновідомим є факт наявності в дерев потужних глибоких корневих

систем, що сягають глибину до десятків метрів. Але багато дерев мають не менш розвинене поверхнєве горизонтальне коріння (Huz et al., 2009; Maliuha & Khryk, 2010; Eismont, 2014). Більшість коренів дерев знаходиться в товщі ґрунту до 60 см. Так, наприклад, для дуба звичайного *Q. robur*, коріння якого може проникати на глибину 15 – 23 м, характерне горизонтальне і шнуроподібне коріння, що зосереджене на глибині 15 – 40 см, це тонке коріння діаметром 10 – 30 мм (Huz et al., 2009; Mauer et al., 2015), важливе в живленні електрико-генеруючих мікроорганізмів продуктами фотосинтезу. Сосна лісова *P. silvestris*, глибина залягання коріння якої може сягати до 30 – 60 м, на бідних ґрунтах утворює потужну поверхнєву кореневу систему з короткими дрібними корінцями, як правило з мікоризою (Munzenberge et al., 2004; Aucina et al., 2007; Raudaskoski & Salo, 2008). Значна частина коріння сосни зосереджена на глибині до 10 см (Ganatsas & Spanos, 2005; Maliuha & Khryk, 2010). Коренева система вільхи чорної *Al. glutinosa* та берези повислої *B. pendula* теж розташовані поверхнєво (Zuzuk et al., 2007; Ostonen et al., 2013), часто пов'язана мікоризою (Baxter & Dighton, 2001). Органічні виділення приповерхнєвого горизонтального коріння дерев істотні для створення мікроорганізмами біоелектричного потенціалу.

В лісах велика кількість органічного опаду, який є джерелом поживних речовин для розвитку електро-продукуючих мікроорганізмів. Мікориза, що сполучає всі дерева в лісі між собою та простягається на кілометри під землею, розповсюджуючи органічні продукти фотосинтезу дерев лісу створює оптимальні умови для розвитку мікроорганізмів, що генерують електричний потенціал. Тому на наш погляд саме в лісових зразках зафіксовані такі високі значення біоелектрики. Наявні вищеперераховані багаточисельні сприятливі фактори для створення мікроорганізмами біоелектричного потенціалу в лісових масивах компенсують менш сприятливі умови для збору біоелектрики, в порівнянні з заболоченими територіями. Із вдосконаленням технології збору електрики ґрунтів лісові мікробо-рослинні асоціації можуть стати важливим джерелом альтернативної енергії поселень волинського Полісся та лісових регіонів Бескид.

Зафіксований високий середній біоелектричний потенціал в садах та заболочених луках є несуттєво нижчим, ніж в лісах (рис. 4.1.1) ($P > 0.05$, $p > 0.516$ та 0.492). Садові агроекосистеми наближені за умовами розвитку електрогенеруючих мікроорганізмів до умов лісу, а болотні екосистеми компенсують відсутність таких оптимальними умовами для збору біоелектрики. В окремих агроекосистемах та заболочених екосистемах зафіксовані досить високі значення біоелектричного потенціалу, що відкриває перспективи використання цих територій як джерела біоелектрики.

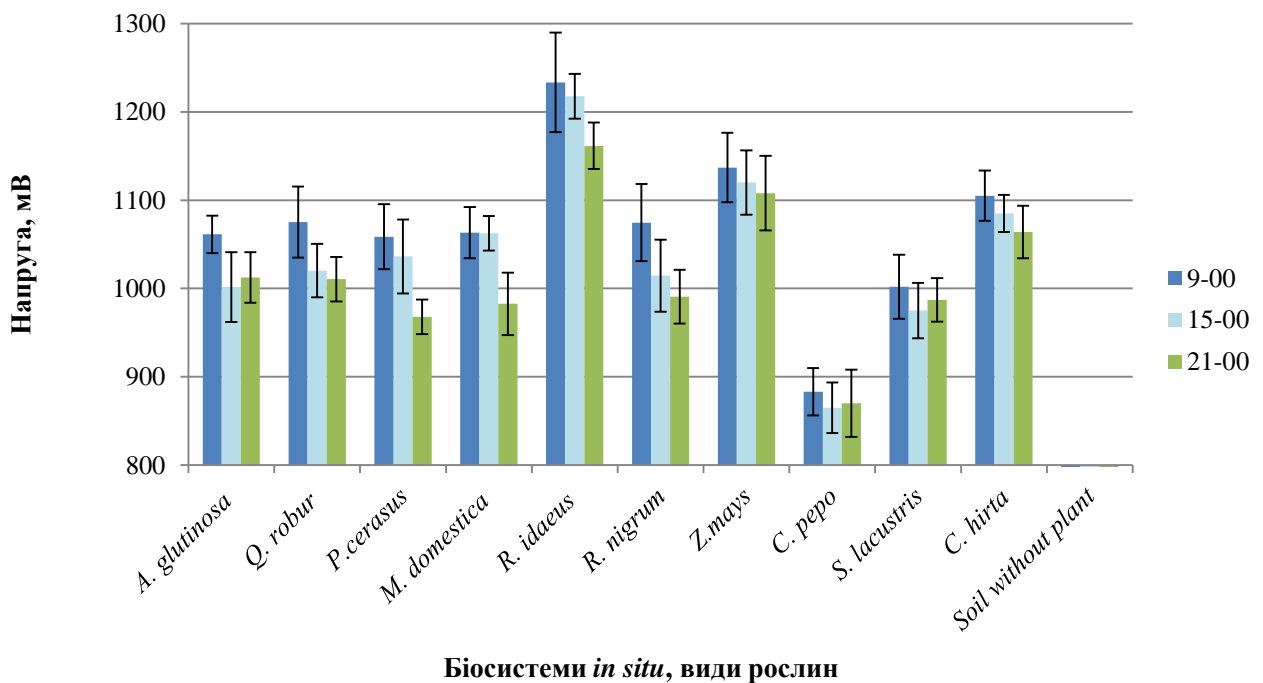


Рис. 4.1.2 Добові коливання напруги фітомікробоценозів:

лісових екосистем, дерев *A. glutinosa*, *Q. robur*; фруктових садів, дерев *P. cerasus*, *M. domestica* та кущів *R. idaeus*, *R. nigrum*; сільсько-господарських культур *Z. mays*, *C. pepo*; заболочених луків, трав *S. lacustris* і *C. hirta* та ґрунту без рослин як контролю на 90-ий день експерименту ($x \pm SE$, $n=50$).

*Напруга ґрунту без рослин становить 68.7 ± 3.0 мВ.

Найвищі значення напруги зафіксовані в 9-00 та 15-00 годині, в 21-00 годині спостерігається невелике зниження рівня біоелектричного потенціалу ($P > 0.05$)

Так, середня напруга садових мікробно-рослинних асоціацій фруктових кущів *R. idaeus* становив 1220.9 мВ, а екосистем заболочених луків *C. hirta* 1111.8 мВ на 90-й та 91-й день експерименту (рис. 4.1.2, 4.1.3).

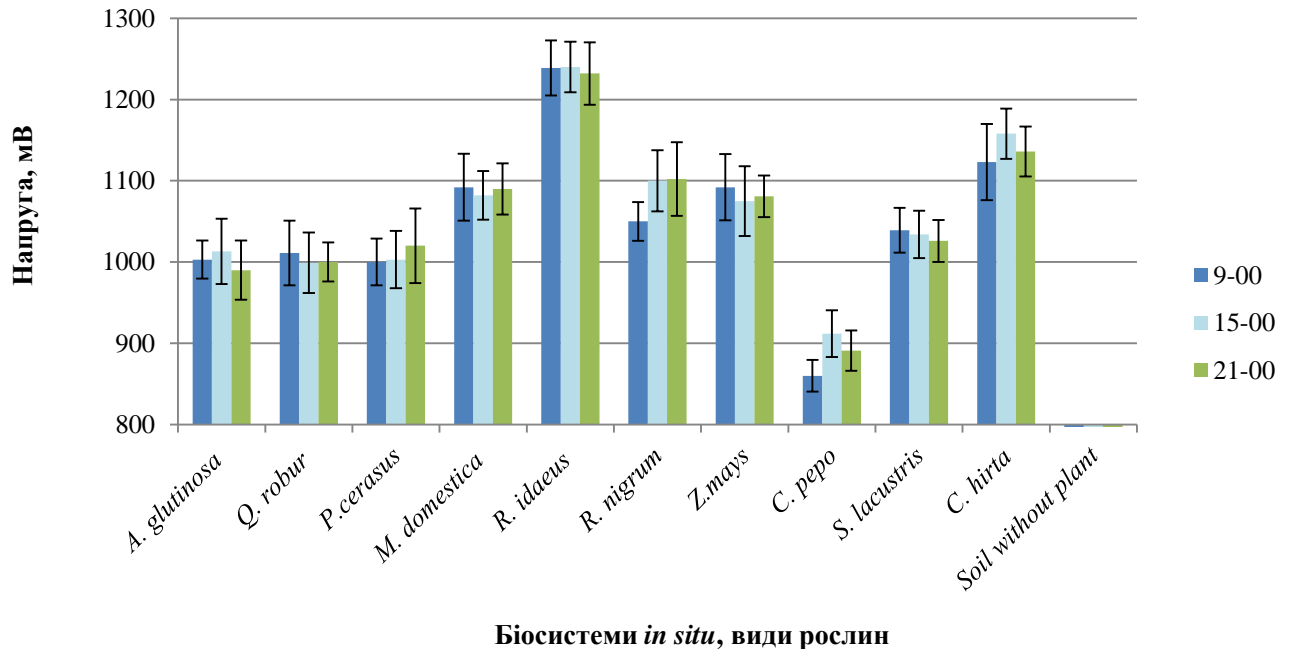


Рис. 4.1.3 Добові коливання напруги фітомікробіоценозів:

екосистем лісу, дерев *A. glutinosa*, *Q. robur*; фруктових садів дерев *P. cerasus*, *M. domestica* та кущів *R. idaeus*, *R. nigrum*; сільсько-господарських культур *Z. mays*, *C. pepo*; заболочених луків, трав *S. lacustris* і *C. hirta* та ґрунту без рослин як контролю на 91-ий день експерименту ($x \pm SE$, $n=50$).

*Напруга зразків без рослин становить 66.3 ± 2.4 мВ.

Коливанні напруги є незначною протягом доби з 9-00 до 21-00 години ($P > 0.05$)

Низький середній рівень напруги екосистем городніх рослин, в порівнянні з лісовими екосистемами, нижчий в середньому на 106.1 мВ ($P < 0.05$, $p > 0.995$) може бути пов'язаний в основному тим, що в полях не має сформованих багаторічних симбіотичних зв'язків між рослинами та ґрунтовими бактеріями, присутніх в лісах, садах, луках сінокосах та пасовищах, адже ґрунт сільсько-

господарських угіддь щонайменше двічі на рік переорюється, а інокуляція біодобривами малопоширена. В результаті цього ефективність поступлення корневих виділень, багатих поживними речовинами для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів, є нижчою. Рослинний опад, що слугує ще одним джерелом поживних речовин для розвитку мікроорганізмів, відсутній в екосистемах сільсько-господарських культур. Крім цього, активне використання різного роду пестицидів, гербіцидів та хімічних добрив в умовах неорганічного землеробства пригнічує ріст мікроорганізмів. Вимивання корневих виділень, важливих для генерації біопотенціалу та розподіл їх по вертикальному профілю проходить більш інтенсивно в таких ґрунтах, де нема стабільно розвинутих потужних корневих систем.

Винятком, серед проаналізованих агроекосистем є біоелектрико-продуктивність посівів кукурудзи. Кукурудза – високопродуктивна культура, що за короткий час вона формує більше органічної маси, ніж інші культурні рослини (Mokriienko & Tsentylo, 2011). Біоелектричний потенціал кукурудзи, фотосинтетична поверхня якої перевищує більшість городніх рослин та здатна активно жити електрико-генеруючі мікрорганізми є на рівні екосистем садових кущів та дерев, в середньому становить 1102.5 (рис. 4.1.2).

Добові коливання продукування біоелектрики є не істотними ($P > 0.05$, $p > 0.943$) (рис. 4.1.2, 4.1.3). Так, наприклад, середня добова різниця між максимальним та мінімальним значенням біоелектричного потенціалу, що спостерігалася протягом 90-ого та 91-ого дня експерименту складає 48.38 мВ. В динамічній картині коливань напруги рослинно-мікробних асоціацій екосистем протягом доби спостерігається кілька типів: 1) рівень біоелектрики залишається майже рівним на протязі світлової доби, різниця напруги складає лише 22.91 мВ, (рис. 4.1.3); та 2) найбільш високі значення біоелектрики зафіксовані зранку о 9-00 год. та в обід о 15-00 год., а ввечері (21-00 год.), спостерігається деяке зниження рівня напруги (рис. 4.1.2). Добова різниця біоелектричного потенціалу між ранковим та вечірнім значенням становить в середньому 50.94 мВ на 90-ий

день експерименту. Ранкове значення напруги фітомікробоценозу *P.cerasus* вище від вечірнього на 90.7 мВ, а біосистеми *R. nigrum* на 83.7 мВ.

Аналогічні результати представлені в дослідженнях Nguyen and Nitorisavut 2019 року, які повідомляють, що вихід біоелектрики є вищим у фотоперіоді, в порівнянні з темною пори доби. Ймовірно, це пов'язано із залежними від часу процесами фотосинтезу. Так, в світлову фазу доби відбувається активне використання та кореневий транспорт насинтезованих в темнову фазу фотосинтезу органічних сполук, необхідних для активності електрико-генеруючих мікроорганізмів. Рівень фотосинтезу та, відповідно, накопичених органічних сполук, субстратів для розвитку електро-активних мікроорганізмів, залежний від метеорологічних умов, фізико-хімічних ґрунтових чинників, є специфічними для кожної екосистеми та нового дня, тому ми спостерігаємо невеликі коливання в рівні біоелектричного потенціалу.

Експерименти по впливу вологості на рівень біоелектрики *in situ* демонструють трохи інші результати, ніж в сконструйованих лабораторних екосистемах, де показана пряма залежність впливу вологості на електропродуктивність (Nguyen & Nitorisavut, 2019). Природні екосистеми є значно більш складними, ніж змодельовані системи та зазнають впливу більшої кількості чинників, які неможливо змодельовати в лабораторних умовах. Вологі субстрати є більш оптимальними для збору біоелектрики, ніж недостатньо зволожені ґрунти, але ряд вище перелічених оптимальних факторів для розвитку електро-активних мікроорганізмів в лісах та фруктових садах компенсують сухість ґрунту та приводять до рівня напруги на рівні вологих місцезростань (рис. 4.1.1). В багатьох екосистемах в сухих ґрунтах (до 30% вологості) спостерігався рівень біопотенціалу на рівні з вологими (31 – 70%) та мокрими (71 – 100%) ґрунтами або навіть вищий (рис. 4.1.1). Середній біоелектричний потенціал лучних мікробно-рослинних асоціацій, для місцезростання яких характерні висока вологість ґрунту, є навіть дещо нижчим від біоелектричного потенціалу лісів, з невисокою вологістю ґрунту. Так, наприклад, біоелектричний потенціал лісової мікробно-рослинної асоціації А.

glutinosa суттєво не відрізняється від *Q. robur* на 70-ий день експерименту та становить 1001.3 мВ супроти 1010.3 мВ ($P > 0.05$), хоч перші дані отримані з сухого ґрунту із вмістом води 15%, а наступні – з ґрунту із вологістю 45% (рис. 4.1.4, 4.1.5).

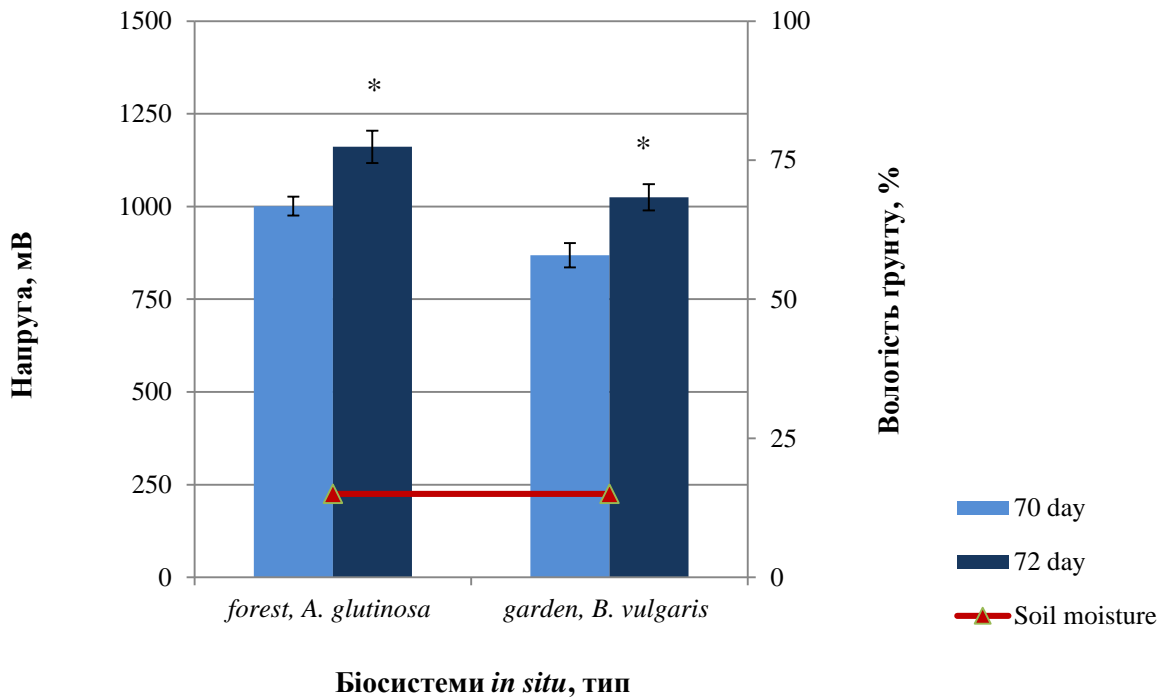


Рис. 4.1.4 Напруга біосистем при однаковій вологості ґрунту (15%) на 70-ий та 72-ий день експерименту ($x \pm SE, n=5$).

*Незважаючи на засушливість ґрунту на 72-ий день рівень напруги істотно зростає ($P < 0.05$)

Водночас, нерідким є той факт, що в тих самих зразках ґрунту, при однаковій вологості ґрунту, в тому числі, при однаковій сухості ґрунту (10 – 20%), чи при зниженні вологості, біоелектричний потенціал суттєво зростає на протязі кількох днів ($P < 0.05$). Наприклад, суттєве зростання рівня біоелектрики спостерігається в лісових та овочево-садових фітомікробіоценозах *A. glutinosa* та *B. vulgaris* при однаковій вологості ґрунтових зразків (15%) на 70-ий та 72-ий день експерименту, різниця між рівнем біоелектричного потенціалу складає 160.2 та

155.7 мВ ($P < 0.05$) (рис. 3.1.4). Подібна картина спостерігається у вологому ґрунті (45%) на 70-ий та 72-ий день експерименту у фітомікробіоценозах асоціаціях лісу та овочевих садів, *Q. robur* та *C. pepo* var. *giraumontia*. Підвищення напруги на 72-ий день експерименту істотне і складає 85.2 та 78.8 мВ, відповідно, незважаючи на відсутність змін у вологості ґрунту ($P < 0.05$) (рис. 4.1.5).

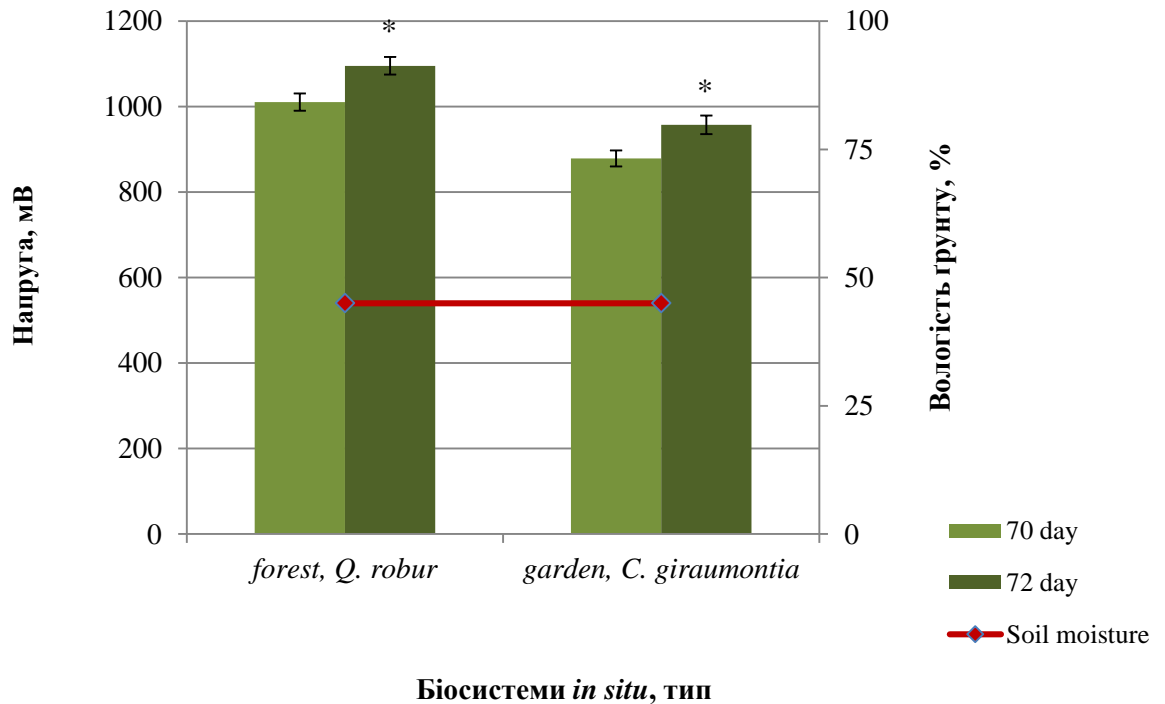


Рис. 4.1.5 Напруга біосистем при однаковій вологості ґрунту (45%) на 70-ий та 72-ий день експерименту ($x \pm SE, n=5$)

*Незважаючи на однакові умови вологості ґрунту, на 72-ий день рівень напруги істотно зростає ($P < 0.05$)

При зниженні вологості із 55% на 81-ий день експерименту до 25% на 89-ий день експерименту, рівень напруги істотно піднімається у садових та городніх біосистемах з рослинами *R. rubrum* та *B. oleracea* (4.1.6). Підвищення напруги складає 96.3 та 81.7 мВ, відповідно ($P < 0.05$). Ці дані, водночас, є ще одним доказом рослинно-мікробного походження біоелектрики ґрунту, така картина

була б неможливою, якщо б електрика ґрунту була наслідком тільки катіонно-аніонного складу ґрунту.

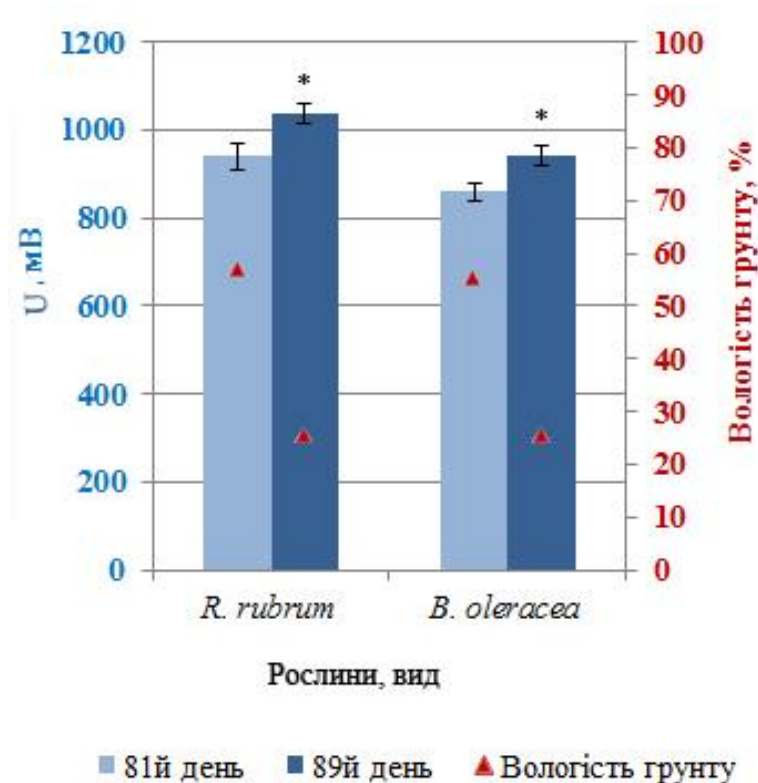


Рис. 4.1.6 Напруга рослино-мікробних садових та агрокультурних біосистем при зниженні вологості ґрунту із 55% на 81-ий день експерименту до 25% на 89-ий день експерименту ($x \pm SE, n=5$).

*Незважаючи на зниження вологості ґрунту на 89-ий день рівень напруги істотно зростає ($P < 0.05$)

Високі показники біоелектрики в сухих ґрунтах, коли електропровідність ґрунту низька може бути наслідком активних рослинних виділень та їх концентрації у ґрунті, на відміну від мокрих ґрунтів, коли хоч більш інтенсивно ідуть метаболічні процеси рослин та мікроорганізмів, що генерують біоелектрику, але і одночасно, в певних умовах, можливе інтенсивне вимивання та розподіл корневих виділень по всій товщі ґрунту по вертикальному профілю, а отже, позбавлення ґрунтових мікроорганізмів ресурсів для генерування біоелектрики. Особливо, активне вимивання в сільсько-господарських екосистемах в культурах

з відсутнім супутнім рослинним покривом, який утримує дощову воду. Тому за умов дощової погоди, можуть бути зафіксовані низькі показники біоелектрики та нижчі, ніж в сухих ґрунтах, особливо в городніх культурах.

Виявлений факт високих показників біоелектрики в сухих ґрунтах, та її зростання із збільшенням сухості ґрунту, є ще одним доказом того, що отримувана біоелектрика визначається насамперед фотосинтез-залежною активністю рослин, функціонуючих в широкому діапазоні умов, залежних від цілого комплексу факторів та здатних акумулювати вологу і за умов сухості ґрунту. Це ілюструє і той факт, що при схожих умовах вологості, рН, ґрунти з рослинами і без них, істотно відрізняються значеннями напруги ($P < 0.05$) (рис. 4.1.7). Середній рівень напруги фітомікробіоценозів лісового дерева *B. pendula* та

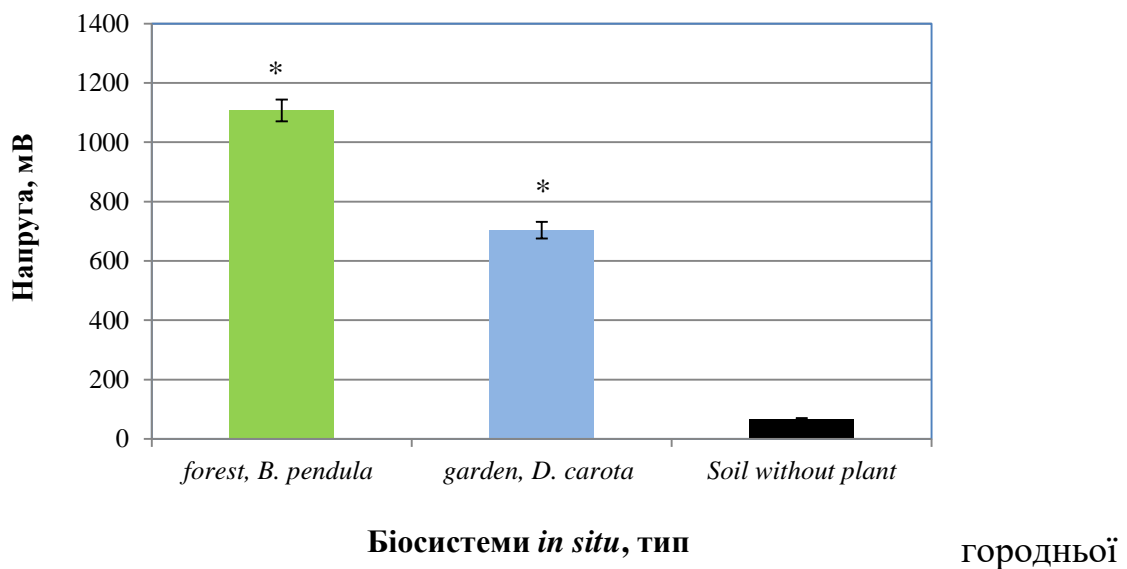


Рис. 4.1.7 Напруга лісових та городніх біосистем та ґрунту без рослин за умов низької вологості ґрунту (15%) ($\bar{x} \pm SE$, $n=50$)

*При однаковому рН ґрунту та вологості ґрунту середній рівень напруги фітомікробіоценозу лісу та овочевого саду істотно перевищує потенціал ґрунту без рослин ($P < 0.05$)

культури *D. carota* перевищують біопотенціал ґрунту без рослин в 15.5 та 10.5 разів. Високі значення напруги у сухому ґрунті з рослинами та низькі у такому ж сухому ґрунті без рослин є свідчення того, що низька вологість (10 – 20%) не є визначальним фактором для розвитку електрико-продукуючих мікроорганізмів, натомість вирішальними є рослини, які постачають електро-активним мікроорганізмам необхідне органічне живлення та вологу.

Водночас, в багатьох екосистемах, відмічено позитивний зв'язок між зростанням вологості та біоелектрики (рис. 4.1.8). Відомо, що при високій

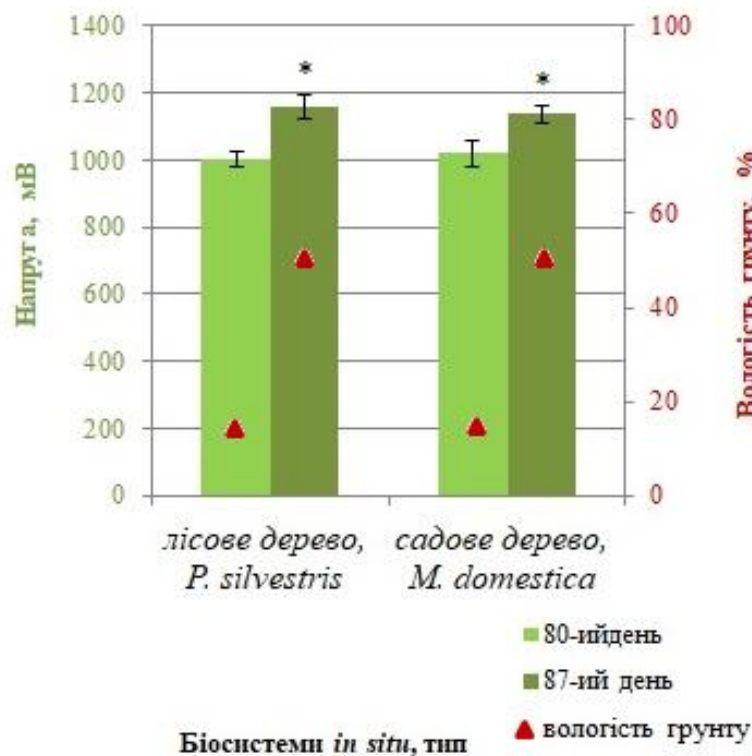


Рис. 4.1.8 Вплив зростання вологи на напругу лісових та садових біосистем впродовж 80-ого та 87-ого днів експерименту ($x \pm SE$, $n=5$).

*Зафіксовано істотний позитивний вплив росту вологості ґрунту на зростання напруги ($P < 0.05$)

вологості ґрунту більш активно відщеплюються та мігрують заряджені частинки, активно відбувається фотосинтез, з підвищенням вологості ґрунту електропровідність мала б тільки зростати, якщо б це був єдиний основний

чинник впливу. Так, при зростанні вологості від 15% до 55% впродовж 80 – 87 днів експерименту істотно зростає і рівень потенціалу лісових та садових фітомікробоценозів ($P < 0.05$). Ріст напруги лісових біосистем *P. silvestris* та садових *M. domestica* складає 159.3 мВ та 115.4 мВ, відповідно ($P < 0.05$) (рис. 4.1.8).

Незважаючи на щоденні коливання рівня біоелектрики, пов'язані з рівнем фотосинтетичної активності рослин та багатьма чинниками зовнішнього середовища сезонні зміни напруги на початку літа і вкінці осені є неістотними. Так, наприклад, середня напруга садових фітомікробоценозів *P. communis* та *R. idaeus*, як і екосистем заболочених луків *C. brizoides* та *P. palustris*, 1-ого та 5-ого місяців експерименту відрізнялася неістотно, різниця складала від 34.2 до 60.9 мВ ($P > 0.05$, $p > 0.632 - 0.770$) (рис. 4.1.9).

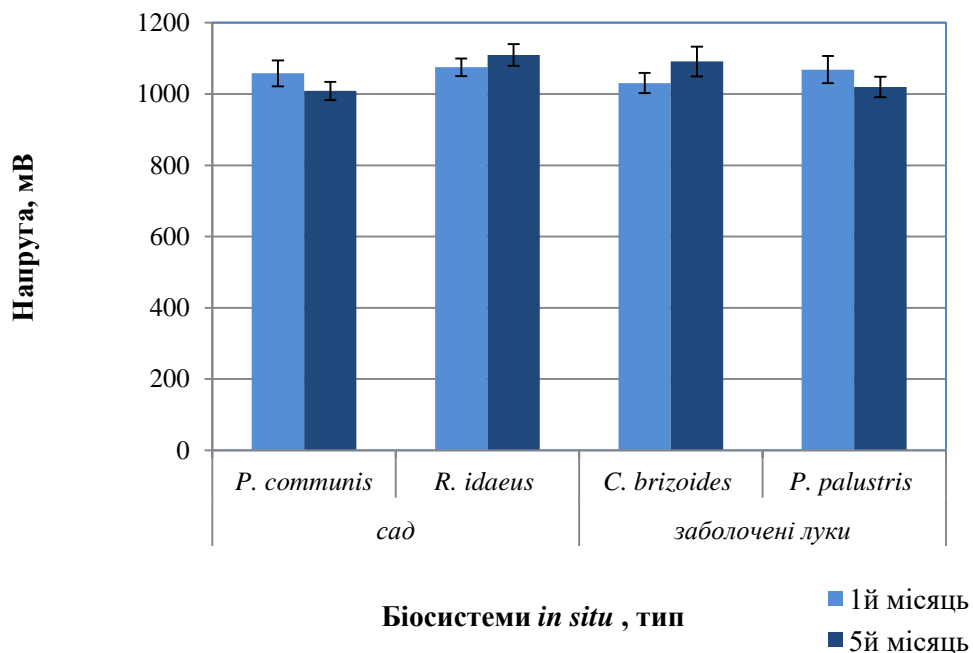


Рис. 4.1.9 Середня напруга садових та болотистих біосистем протягом 1-ого та 5-ого місяця експерименту ($\bar{x} \pm SE$, $n=50$).

Сезонні зміни середньої напруги біосистем є неістотними ($P > 0.05$, $p > 0.632 - 0.770$)

Високі та стабільні середні значення напруги фітомікробоценозів лісів та заболочених луків, фруктових садів та деяких сільсько-господарських культур з червня по жовтень, ріст потенціалу навіть в посушливих умовах розкривають їх перспективи як важливого джерела відновлювальної енергії.

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександрю Медведєву за консультації і магістрам-екологам Сергію Нікітчуку та Богдану Валько за допомогу у реєстрації біоелектричних показників *in situ* та за технічну допомогу в експериментах при конструюванні систем збору біоелектрики.

Матеріали підрозділу 4.1 представлені в патентах і наступних публікаціях

Русин, І.Б., Медведєв, О.В., Валько, Б.Т. (2020). Біоелектрика екосистем лісів, заболочених лук та агроекосистем Західної України. *Наукові праці Лісівничої Академії наук України*, 20, 33-44. <https://doi.org/10.15421/412003> **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**

Русин І. Б., Дячок В. В. (2020). Перспективи використання природних лісових екосистем для отримання рослинно-мікробної біоелектрики. В: Колективна монографія «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Львів,ТзОВ "ЗУКЦ", 124-140. **Розділ монографії**

Rusyn I., & Djachok V. (2021) Bioelectric parameters of *Pinus silvestris* forest ecosystems. *Environmental problems*, 6(2), 59-63. <https://doi.org/10.23939/ep2021.02.059> **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**

4.2 Отримання біоелектрики у паркових зонах міст

Парки є невід'ємною частиною кожного міста, як його біофільтри, важливі кліматорегулятори та місце рекреації городян (Rusyn, 2013; Bertram & Rehdanz, 2015; Karade et al., 2017). Зелені міські насадження: парки, сквери, лісопарки, озеленення вздовж будинків та вулиць, знижують концентрацію парникових газів CO₂, NO₂ та очищують повітря, детоксикуючи поллютанти, що нагромаджуються в атмосфері в результаті роботи сотень автомобілей та виробництв (Nowak et al., 2006; Zhao et al., 2010; Zhang et al., 2014), в тому числі від забруднень важкими металами (Shikhova, 2019). Парки відіграють важливу роль у зменшенні температури міського острова тепла, що продукують розпечені сонцем бруківка та асфальтоване дорожнє покриття і будинки, і формують паркові острови холоду тим самим зменшуючи енерговитрати на кондиціонування (Bowler et al., 2010; Cao et al., 2010; Maimaitiyiming et al., 2014). Дослідження Sorensen et. al (2017) показали, що 10%-не збільшення площі зелених насаджень міста зменшує CO₂-спряжені енерговитрати на охолодження на 5 – 10%. В умовах урбанізації міські зелені насадження є осередком природи в місті, зв'язком городянина з навколишнім середовищем, місцем відновлення після стресів і збереження здоров'я та покращують якість життя людей (Bedimo-Rung et. al., 2005; Braubach et al., 2017; Picavet et al., 2016).

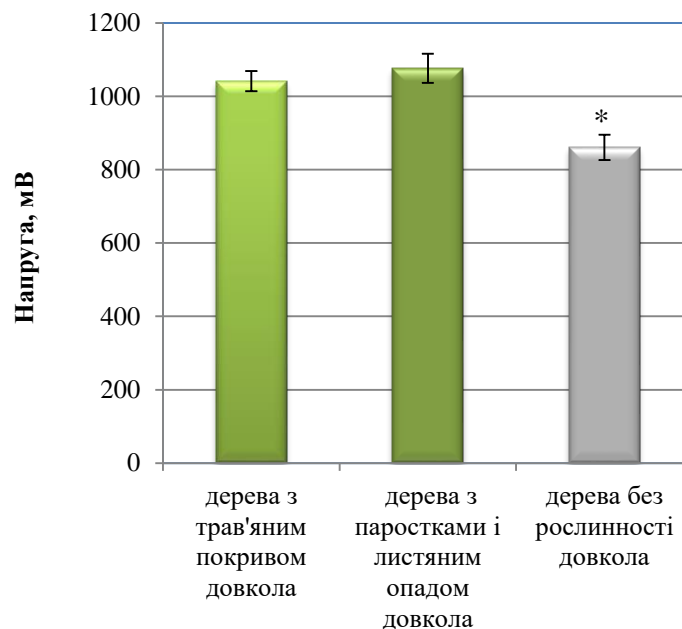
Паркові насадження займають вагому частину від загальної площі міст, так, наприклад, у м. Львові 4.4 тис га заняті під паркові зони, що становить 26% від площі міста, у Києві – 5.5 тис га (6.5%), у Харкові – 3.4 тис га (9.7%), у Варшаві (Польща) – 12.8 тис га (25% від території міста). В сучасному містобудуванні під парки відводиться великі території через їх вирішальну роль для здоров'я та самопочуття міських мешканців, враховуючи рівномірність розподілу по території міста та просторову доступність кожному (Huseynov, 2011; Karade et al., 2017; Li et al., 2019). Кількість зелених площ у містах буде невпинно зростати як в контексті захисту від наслідків глобальної зміни клімату: пом'якшення

аномальної спеки та затоплень у містах, так і боротьби з нею (European Environment Agency 2012, 2016; Kabisch et al., 2016). Рослинні урбо-екосистеми розглядаються як важливий інструмент для вирішення існуючих екологічних проблем (Haase, 2017). Як приклад, Азербайжан, де прийнято стратегічний план збільшення зелених насаджень в межах міст, в рамках якого в Баку в продовж 2005 – 2010 років кількість зелених зон в місті зросло від 974.7 га до 1.6 га (Huseynov, 2011). Серед щільної забудови існуючих міст місця для озеленення знаходять на місці старих виробництв та залізниць (Eckerd, 2011; Banzhaf & McCormick, 2007; Nowaska-Rejzner, 2019). Останнім часом з'явилося багато концепцій щодо майбутньої зеленої урбанізації та зелених еко-міст 21-ого століття (de Jong et al., 2015).

Значні території міських зелених зон, рівномірно розподілених по карті сучасних міст як інструментарій антиглобально-кліматичних змін зможуть набути ще одного важливого значення в разі вдосконалення технологій збору зеленої електрики та виступати альтернативним джерелом енергії і тим самим зменшувати CO₂-залежні енерговитрати пов'язані з інфраструктурою парків. В паркових зонах рослинно-мікробна біоелектрика зможе забезпечувати освітлення паркових територій та дичячих майданчиків, а в перспективі, живити точки доступу Wi-Fi, служити для енергозабезпечення зон автономної роботи з ноутбуками, заряду мобільних телефонів, електросамокатів, енергозабезпечення інтерактивних лавок. Біоелектропродуктивність паркових зон як джерела мікробно-рослинної біоелектрики залишалися недослідженими. Тому, ми поставили перед собою завданням оцінити можливості використання і перспектив міських парків та лісопарків як джерела мікробно-рослинної біоелектрики.

Проведені дослідження в паркових та лісопаркових екосистемах містах Львова показали достатньо високі показники значень напруги. Середня напруга найбільш поширених у парках фітомікробценозів дерев з розвинутим трав'яним покривом довкола них становить 1041.8 мВ (рис. 4.2.1). Найвищі значення напруги часто зафіксовані на відстані до 1 м від стовбура дерева. Динаміка зміни напруги в міру віддаленості від стовбура дерева наступна: найвищі значення

спостерігаються на віддалі 0.5 – 1.5 м. З подальшим віддаленням від стовбура дерева значення напруги дещо спадають і знову зростають на відстані 3 м, очевидно, через приєднання органічних виділень горизонтальних корневих систем суміжних дерев (рис. 4.2.2, 4.2.3). Так, наприклад, напруга рослинно-мікробної паркової асоціації липи серцеволистої *T. cordata* з газонною травою довкола на відстані 0.5 – 1.5 м від стовбура дерева становить 1114.5 – 1178.5 мВ, із подальшим віддаленням від стовбура дерева знижується на 88.9 мВ на віддалі 2 м та ще на 55.4 мВ на віддалі 2.5 м від стовбура та знову зростає на віддалі 3 м на 95.3 мВ (рис. 4.2.2).



Біосистеми *in situ* в паркових і лісопаркових екосистемах, типи

Рис. 4.2.1 Середня напруга паркових і лісопаркових біосистем на протязі 6 місяців спостережень ($\bar{x} \pm SE$, $n=30$).

*Напруга біля дерев з ущільненим ґрунтом без трав'яного покриву істотно відрізняється від потенціалу біля дерев з трав'яним покривом довкола, а також лісопаркових екосистем ($P < 0.05$)

В лісопаркових зонах з розвинутим нижнім ярусом рослинності: численними молодими деревами та шаром листяного опаду зафіксовані дещо вищі та близькі до попередньої групи середні значення біоелектричного потенціалу, 1076.7 мВ

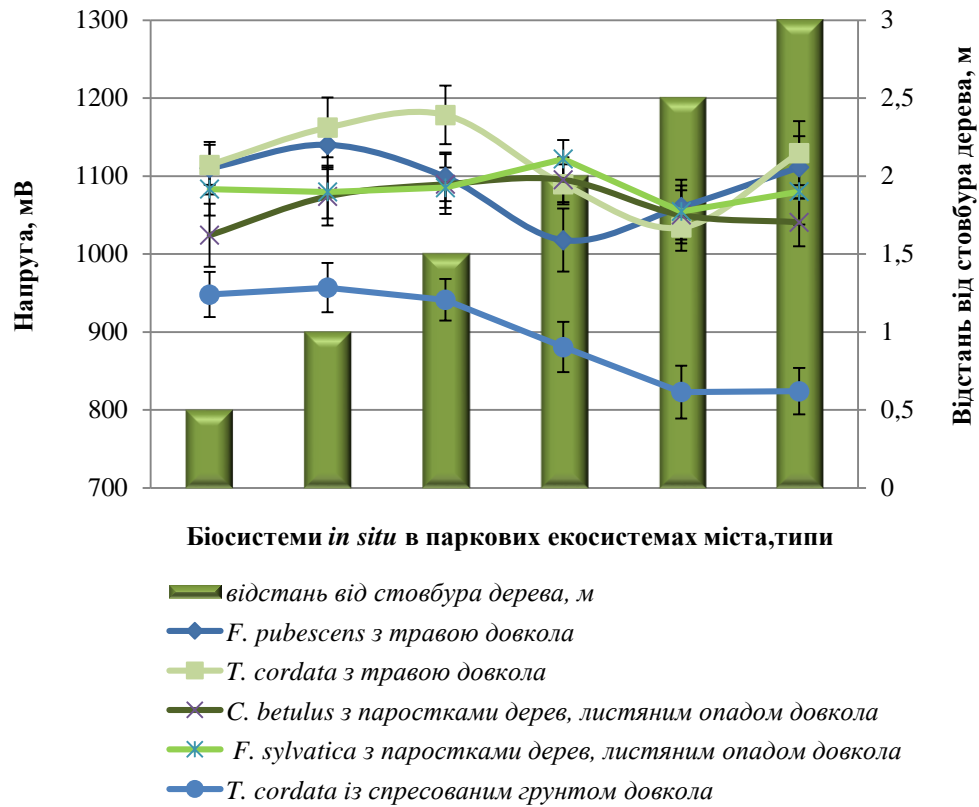


Рис. 4.2.2 Зміна значень напруги біосистем в паркових екосистемах при віддаленості від стовбура дерева до 3м ($x \pm SE$, n=30).

Напруга знижується по мірі віддалення від позначки 1.0-1.5 м від стовбура дерева та знову зростає при наявності поруч інших дерев.

В лісопаркових екосистемах з паростками дерев та опалим листям зміни напруги незначні із віддаленістю від стовбура ($P > 0.05$)

($p > 0.516$) (рис. 4.2.1). Найвище значення біоелектричного потенціалу зареєстровано на відстані 1.5 м від стовбура дерева та становить 1392.1 мВ, а мінімальне на відстані 2.5 м від стовбура дерева та складає 984.5 мВ. Екосистеми лісопаркових зон, характеризуються більш складною картиною зміни напруги у міру віддаленості від стовбура дерева, переважно, через вплив корневих виділень

паростків молодих дерев, розташованих довкола стовбура материнського дерева (рис. 4.2.2 - 4.2.4).

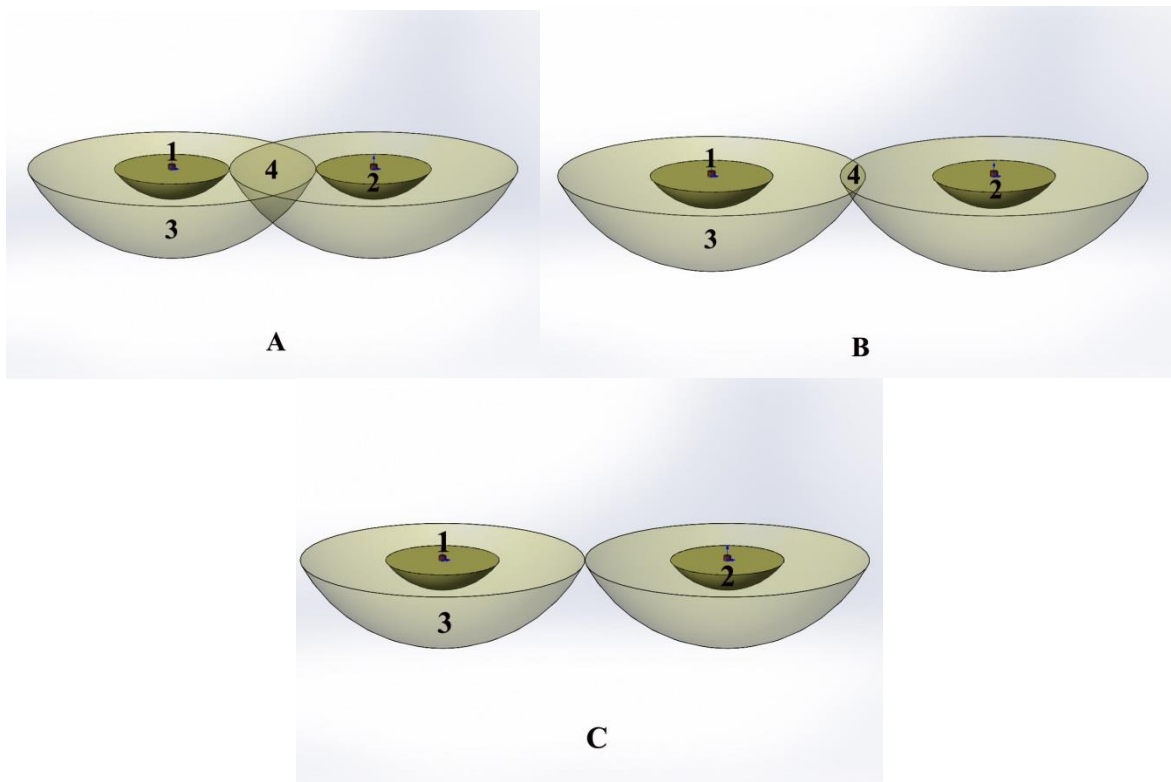


Рис. 4.2.3 Зміна концентрації сумарних корневих систем в залежності від віддалі між сусідніми деревами:

1 – стовбури дерев; 2 – зона концентрації основної маси кореневої системи дерева в ґрунті; 3 – зона поодиноких коренів; 4 – зона перекриття корневих систем сусідніх дерев.

В залежності від відстані між деревами можливі різні варіанти створення оптимальних зон для розвитку електрогенеруючих мікроорганізмів різної площі від обширних (А) до невеликих (В) чи взагалі відсутніх (С). Збільшення концентрації корневих систем веде до максимізації органічних виділень, необхідних для розвитку ґрунтових електро-активних мікроорганізмів

У більшості напрямків від дерева, незалежно від відстані від стовбура дерева, спостерігаються невеликі коливання напруги, очевидно, через вплив паростків



(1)

(2)



(3)

Рис. 4.2.4 Типові дослідні ділянки моніторингу біоелектропродуктивності паркових рослинно-мікробних біосистем:

- (1) ділянки з ущільненим ґрунтом біля дерев, майже повністю позбавлені трав'яного покриву, що є екологічною проблемою багатьох парків України;
- (2) ділянки з розвинутим трав'яним покривом довкола дерева та
- (3) лісопаркові зони з розвинутим нижнім ярусом із паростків молодих дерев та опалим листям довкола дерева

молодих дерев та лісового опаду, розподілених по доколiшній площi, та зростання в точках розташування паростків. Так, наприклад, коливання напруги фітомікробценозу із віддаленістю від стовбура густонасадженого біотопу бука

лісового *F. sylvatica* та граба звичайного *C. betulus* із паростками дерев та листяним опадом становить лише 67.5 – 71.2 мВ, в той час як в паркових екосистемах з рідко насадженими деревами ясена пухнастого *F. pubescens* і липою серцеволистою *T. cordata* та газонною травою довкола дерева складає 122.4 – 144.3 мВ (рис. 4.2.2). В деяких напрямках від дерева прослідковується картина спадання та наступного зростання біоелектричного потенціалу у максимальній віддаленості від стовбура дерева, через очевидно, приєднання кореневих виділень сусідніх дерев.

В процесі аналізу даних середньої напруги рослинно-мікробних біосистем кожного зразка в парках в 4-ьох різних протилежних напрямках довкола стовбура, в частині зразків виявлена асиметрія в значеннях біоелектрики, що зберігається в часі або особливо посилюється в несприятливих умовах вологості, освітлення тощо. В частині зразків в двох чи трьох напрямках від дерева середні значення біоелектричного потенціалу є близькі з статистично несуттєвими коливаннями, в той же час в одному чи двох напрямках значення значно відрізняються від значень, отриманих в інших напрямках в той же самий день. В той же час, в частині екосистем значення середньої напруги статистично несуттєво коливаються в усіх чотирьох напрямках довкола стовбура дерева. Даний факт може бути обумовлений, як особливостями асиметричної кореневої системи дерева, так і впливом кореневих систем сусідніх дерев, органічні виділення яких сумуються та інтенсифікують розвиток електро-активних мікроорганізмів.

Так, наприклад, середня напруга є майже однаковою в усіх 4-ьох напрямках від стовбура дерева *F. pubescens* та несуттєво відрізняється по різних напрямках: на 4.9 – 29.9 мВ 10-ого дня експерименту, на 4.7 – 38.4 мВ на 15-ий день експерименту, на 1.9 – 28.9 20-ого дня експерименту, тобто, аналогічна динаміка зберігається у часі (рис. 4.2.5 А) ($p > 0.255$). Подібна симетрія напруги довкола *T. cordata* 1, різниця між напругою довкола дерева в різних напрямках несуттєва і становить 7.0 – 29.7 мВ ($p > 0.316$) (рис. 4.2.5 В).

В той же час, довкола *A. pseudoplatanus* спостерігається зовсім інша картина.

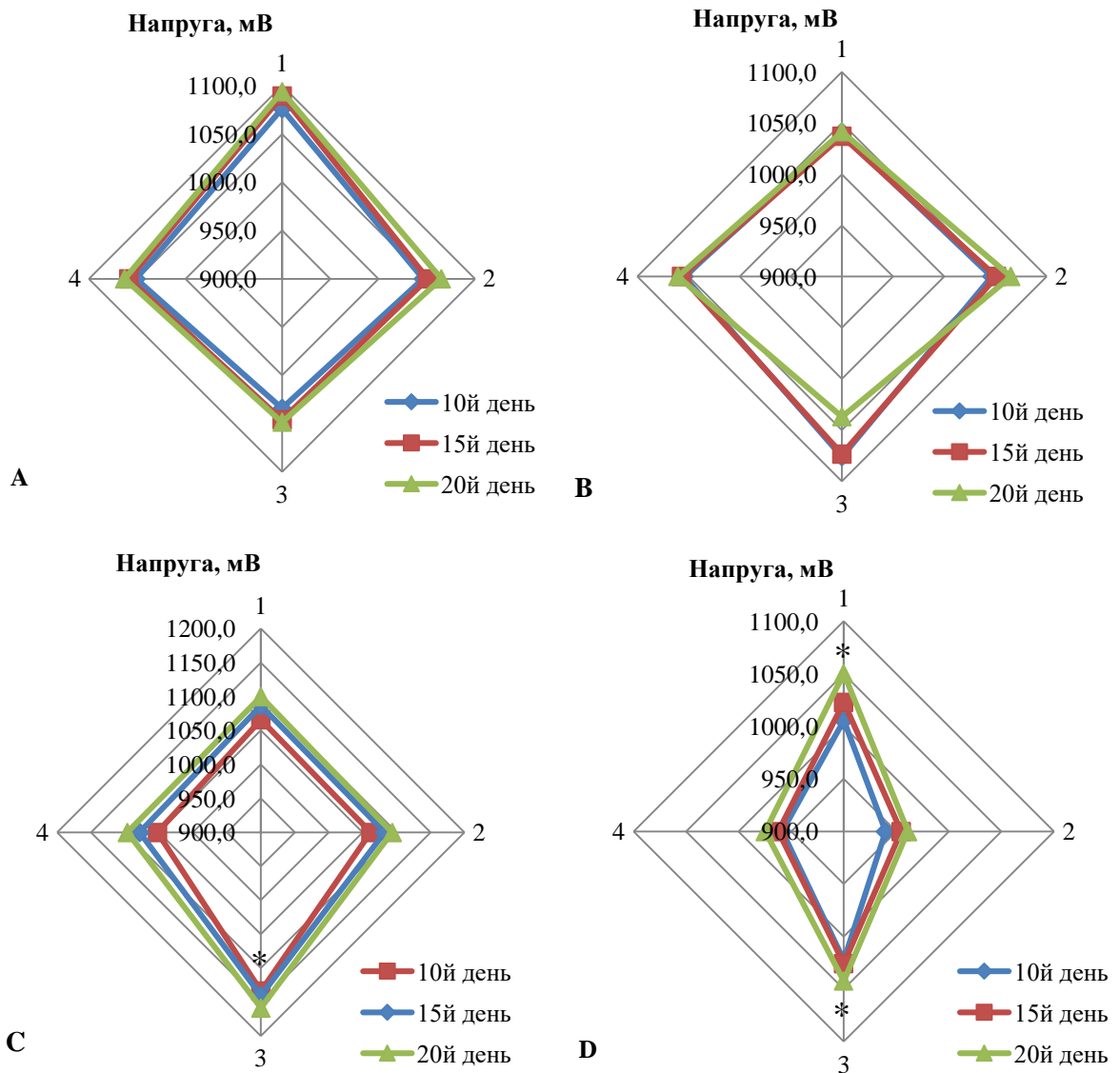


Рис. 4.2.5 Середні значення напруги біосистем у 4-ьох протилежних напрямках довкола дерев 10-ого, 15-ого і 20-ого дня експерименту ($x \pm SE$, $n=20$):

(A) *F. pubescens*, (B) *T. cordata* 1, *A. pseudoplatanus* (C), *T. cordata* 2 (D)

Середні значення напруги біосистем (A, B) є близькими у всіх 4-ьох напрямках довкола дерева, їх різниця є статистично незначима ($p > 0.286$).

*Асиметрія напруги вздовж напрямку 3 біосистеми (C) та напрямків 1, 3 біосистеми (D) є статистично суттєвою в порівнянні з іншими напрямками

Середня напруга між 1, 2 та 3 напрямками довкола дерева відрізняється незначно: на 13.7 – 23.3 мВ 10-ого дня експерименту, на 4.0 – 7.9 мВ 15-ого дня

експерименту і на 3.2 – 6.5 мВ на 20-ий день експерименту. Але, різниця між середньою напругою 4-ого напрямку і середніми по інших трьох напрямках є більше, як на 60 мВ та складає 81.3 мВ ($P < 0.05$), 62.4 мВ ($p > 0.885$), 65.3 мВ ($p > 0.927$) на 10-ий, 15-ий, 20-ий день експерименту, відповідно (рис. 4.2.5 С). Аналогічна асиметрія біоелектричного потенціалу відмічається довкола *T. cordata* 2 (рис. 4.2.5 D). Середній біоелектричний потенціал в двох напрямках від дерева складає 955.1 та 965.1 мВ, і різняться не суттєво що 5 днів, в межах 8.7 – 13.9 мВ, в двох інших напрямках середній біоелектричний потенціал 1026.2 та 1030.2 мВ, з 5-денною різницею в межах 3.2 мВ – 27.2 мВ. Різниця між середнім біоелектричним потенціалом 1-2 напрямку та 3-4 напрямку від дерева складає 82.9 мВ ($P < 0.05$), 71.1 мВ ($p > 0.940$), 89.3 мВ ($P < 0.05$) на 10, 15 і 20 день експерименту відповідно.

Враховуючи явище асиметрії середньої напруги довкола дерев та наявність зон максимальної генерації біоелектрики на певній відстані від стовбура дерева можна більш ефективно використовувати їх як джерела відновлювальної енергії. Важливою екологічною проблемою парків України є витоптування їх територій, в результаті, переущільнення ґрунту та порушення його структури. Такі землі займають до 10 % в багатьох парках України (Fedorovskyy et al., 2013; Denysyuk, 2018). Щоб з'ясувати, чи можуть такі території у парках виступати джерелом енергії ми провели дослідження електропродуктивності таких зон спресованого переущільненого ґрунту біля дерев без трав'яного покриву (рис. 4.2.4, 1). Водночас, такі ділянки є зручним об'єктом для вивчення впливу на генерацію біоелектрики виключно корневих виділень дерев за умов відсутності іншого рослинного покриву та листяного опаду. В середньому, покази біоелектричного потенціалу зон з інтенсивним антропогенним навантаженням є значно нижчими, 861.2 мВ, ніж зафіксовані в паркових екосистемах з трав'яним покривом та лісопаркових зонах ($P < 0.05$) (рис. 4.2.1).

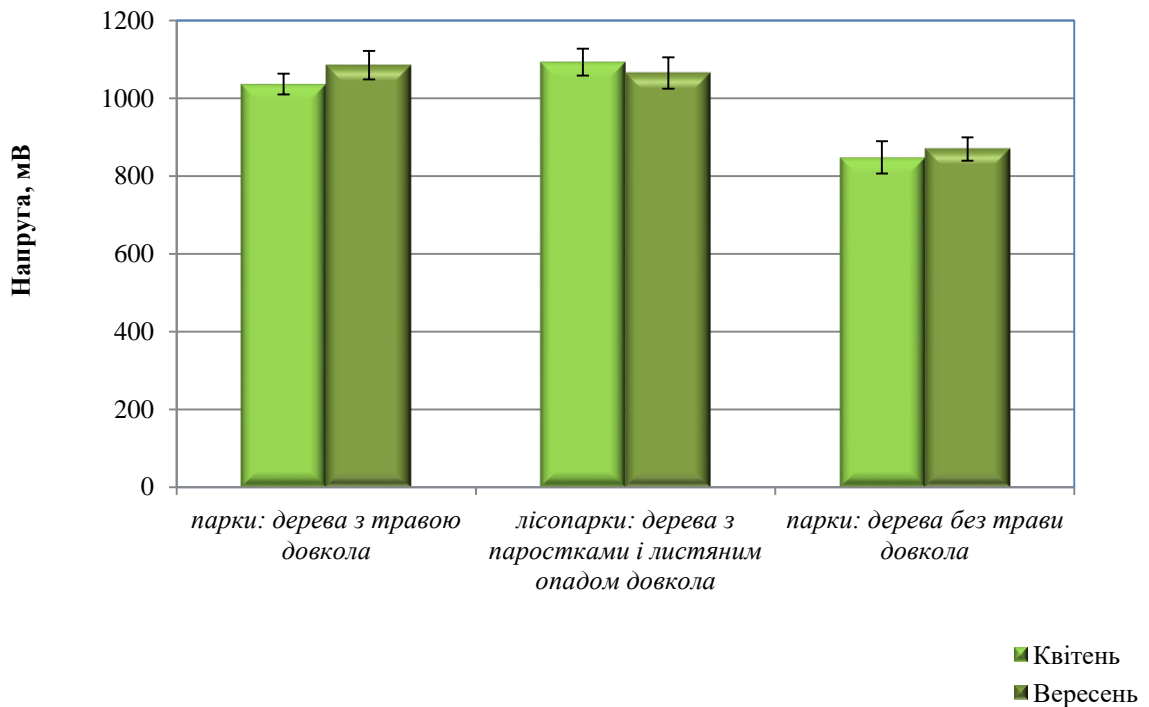
Величина потенціалу фітомікробіоценозів екосистем із спресованим ґрунтом відрізняється на 180.6 мВ та 215 мВ від паркових екосистем з неущільненим ґрунтом та розвинутим нижнім ярусом рослинності ($P < 0.05$). Переущільненість

грунту є негативним фактором для розвитку електро-активних мікроорганізмів, оскільки таким ґрунтам властивий порушений аеро-вологообмін.

Максимальні середні значення напруги в цих умовах, 948.9 мВ, є отриманими на відстані 0.5 – 1.5 м від стовбура дерев, далі із віддаленням від стовбура до 3 м – біоелектричний потенціал падає на 125.8 мВ, незважаючи на однакові умови спресованості, вологості, рН ґрунту. Це підтверджує вирішальну роль корневих виділень дерев для життєдіяльності електрико-продукуючих мікроорганізмів, так як, основна сукупність горизонтальної кореневої системи зосереджена на відстані до 1 – 1.5 м від стовбура, а з її подальшим різким зниженням відповідно зникають сприятливі умов для розвитку мікроорганізмів (Day et al., 2010; Moore, 2019).

Отже, використання ґрунтових ділянок паркових зон, що підпадають під інтенсивне антропогенне навантаження як джерела зеленої енергії є менш ефективним. Середні значення біоелектричного потенціалу в цих умовах спостерігаються нижчі, ніж в парках з трав'яним покривом довкола дерев. Ущільнений ґрунт з пошкодженим аероводним режимом та утрудненим внутрішньо-ґрунтовим транспортом речовин гальмують продукування біоелектрики в вибитих зонах парків міст. Сукупний вплив корневих виділень дерев і трав створює оптимальні умови для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів у паркових зонах без антропогенного навантаження. Зіткнутість крон дерев, що не допускають активного випаровування вологи, так важливої для розвитку електро-активних мікроорганізмів, сукупний вплив корневих систем молодих та материнських дерев, розвиток мікоризи, ефект листяного опаду забезпечують сприятливі умови для генерації біоелектричного потенціалу в лісопаркових зонах міст.

На протязі тижня після інтеграції в ґрунт електродів для збору біоелектрики зафіксовано зростання показників біоелектрики, а далі показники залишаються стабільними з невеликими коливаннями, протягом експерименту, що очевидно, залежить від фотосинтетичної активності рослин, рівня корневих виділень, метеорологічних факторів (рис. 4.2.6).



Біосистеми *in situ* в паркових екосистемах міста, типи

Рис. 4.2.6 Середня напруга біосистем *in situ* в паркових та лісопаркових екосистемах у квітні та вересні ($\bar{x} \pm SE$, $n=30$).

Зміна рівня біоелектрики у квітні та вересні є статистично не суттєвою ($P > 0.05$)

Початкове зростання значень біоелектрики в даному випадку може бути як результатом осадки ґрунту, що веде до більш щільного контакту електродів з ґрунтом, так і наслідком колонізації електродів мікроорганізмами, адже, в природі електроактивні мікроорганізми прикріплюються до різноманітних матеріалів за допомогою клейких речовин та формують нановолокна, через які передають електрони (Lovley et al., 2011). Середньо-місячний біоелектричний потенціал в квітні та вересні статистично суттєво не відрізняється, різниця становить від 21.5 мВ до 48.6 мВ ($p > 0.683$, $p > 0.383$, $p > 0.311$) (рис. 4.2.6).

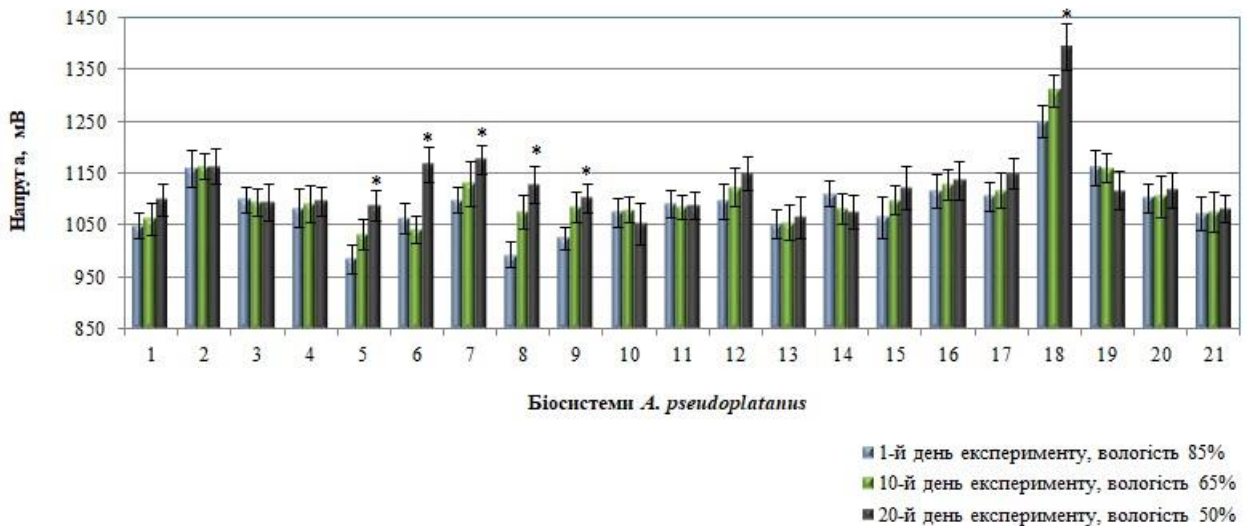


Рис.4.2.7 Вплив зниження вологості ґрунту від 85% до 50% на протязі 20-ти днів експерименту на генерацію біоелектрики рослинно-мікробними біосистемами *A. pseudoplatanus* в парковій екосистемі ($\bar{x} \pm SE, n=20$).

*Зростання рівня напруги із зниженням вологості є статистично суттєвою у 5-9-ої та 18-ої біосистеми ($P < 0.05$)

Паркові екосистеми формують сприятливий режим вологості для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів. Втрата вологи в паркових зонах є мінімальною порівняно з відкритими газонами через зімкнутість крон, що запобігають випаровуванню. Проте під час посушливих погодніх умов і в цих зонах відбувається зниження вологості ґрунту, що може несприятливо вплинути на розвиток мікроорганізмів, задіяних в електрогенезі. Однак, зниження вологості від оптимальних 85% до 50% за однакових умов освітлення 800 Люкс та середньої температури $21.5^{\circ}\text{C} \pm 2.3$ протягом 20-ти днів експерименту має негативний вплив на біоелектричний потенціал лише невеликої кількості біосистем паркових екосистем. В більшості зразків при зниженні вологості, біоелектричний потенціал залишається на такому ж рівні із статистично неістотними коливаннями ($p > 0.193$) або навіть суттєво зростає ($P < 0.05$) (рис. 4.2.7). Так, наприклад, з 21-єї проаналізованої рослинно-мікробної біосистеми *A. pseudoplatanus* паркової екосистеми напруга у 9-ти зберігалася без істотних

коливань, зміна біоелектричного потенціалу становила 3 – 21 мВ ($p > 0.193$), у 3-ьох зразків біоелектричний потенціал падав на від -6 до -45 мВ ($p > 0.540$). У 9-ти біосистем спостерігалось зростання біоелектричного потенціалу, що становило від 44 – 54 мВ ($p > 0.733$) до 77 – 143 мВ ($P < 0.05$) (рис. 4.2.7). Даний факт відсутності пригнічення генерації біоелектричного потенціалу при зниженні вологості ґрунту пов'язаний з альтернативними шляхами отримання вологи потужними кореневими системами дерева та активними фотосинтезом рослин та, відповідно, інтенсивними кореневими виділеннями, що стимулюють ріст електроактивних мікроорганізмів.

Стабільні протягом весняно-осіннього періоду значення біоелектрики фітомікробіоценозів паркових та лісопаркових зон міста, в невеликій мірі залежні від зниження вологості ґрунту, що займають істотну частку загальної площі міста, відкривають перспективи використання їх як відновлювального джерела енергії.

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександр Медведєву за консультації, і студентам-екологам Олександр Патлатюку за допомогу у реєстрації біоелектрики в парках міста, Богдану Валько, Володимир Воронько, Назару Стемпіцькому, Ігорю Селецькому за допомогу в конструюванні структури біосистем.

Матеріали підрозділу 4.2 представлені в патентах і наступних публікаціях

Русин, І. Б., Медведєв О.В., & Патлатюк О. В. (2020). Перспективи отримання біоелектрики у паркових екосистемах міст. *Екологічні науки*, 29, 117-124. doi: 10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.1.19 **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**

4.3 Перспективи використання техногенно забруднених територій для отримання біоелектрики

Техногенно забруднені та деградовані ґрунти є перспективним об'єктом для застосування технології рослинно-мікробної біоелектрики, що залишалися до цього часу поза увагою розробників даної технології, оскільки, відомою є толерантність рослин та мікробних угруповань навколишнього середовища до різного роду поллютантів: нафтових забруднень (Dzura et al., 2010; Rusyn et al., 2003) чи важких металів (Hassen et al., 1999; Singh et al., 2016). Такі землі займають тисячі гектарів, вони ніяк не використовуються та потребують рекультивації. В Україні нараховується понад 1.1 млн. гектарів деградованих та техногенно забруднених земель, 143.4 тис. гектарів порушених земель, які потребують рекультивації (Hroisman, 2017). Найбільш істотним фактором зниження продуктивності земель і зростання її деградації є ерозія ґрунтів, інтенсивно розвиваються процеси лінійного розмиву та яроутворення, площа ярів становить 140.4 тис. гектарів, а їх кількість перевищує 500 тис. (Hroisman, 2017). Забруднення важкими металами є основним фактором забруднення ґрунтів у Європі (Panagos et al., 2013). Розділяючі зелені смуги вздовж автомагістралей, які простягаються на десятки кілометрів в кожному місті та за межами населених пунктів, з високою концентрацією продуктів автомобільних викидів (рис. 4.3.1), є ще одним важливим типом техногенно забруднених ґрунтів, що не входить в їх реєстр та є можливим об'єктом застосування електро-біотехнології в разі розробки ефективних її методів. Зелені смуги вздовж автотрас є специфічним фітомікробоценозом, який підпадає жорсткому впливу коливань метеорологічних факторів та автовикидів за умов, коли повністю виключений сприятливий вплив дерев та кущів. Незважаючи на вимоги до багаторядності насаджень на зелених смугах, в містах України вони зазвичай вкриті тільки трав'яним покривом. В міських зелених насадженнях: парках, скверах з багаторядним озелененням у генерації біоелектричного потенціалу та створенні умов для розвитку електро-

активних мікроорганізмів в рівній мірі чи комбінованій беруть участь як кореневі виділення трав, так і дерев. Тому зелені смуги автотрас є ідеальним об'єктом для вивчення ролі корневих виділень саме трав у генерації біоелектрики, коли вплив корневих виділень дерев абсолютно виключений.



А



В

Рис. 4.3.1 Зони відбору ґрунтових проб та аналізу біоелектричних параметрів на зелених смугах між автомагістралями вулиці Хуторівка (А) та проспекту В'ячеслава Чорновола (В) міста Львова, що простягаються на 1.7 та 2.6 км: (1) біля світлофору, (2) на відстані 250 м від світлофору чи пішохідного переходу (3) на віддалі 500 м від світлофору.

Насадження рослин в техногенно забруднені ґрунти поблизу автотрас в рамках рекультиваційних заходів змогли б відновити їх природний хімічний

склад, зупинити ерозійні процеси в деградованих ґрунтах, а монтування у ґрунти біоелектричних систем за умов їх біоелектро-продуктивності розкрили б їх перспективи як важливого джерела відновлювальної енергетики. Біоелектрика рослинно-мікробних асоціацій вздовж автотрас могла б жити дорожнє освітлення, а в перспективі акумулювати заряд для зарядження електромобілів.

Рівень рослинно-мікробної електрики, що можна добути з деградованих та забруднених ґрунтів досі залишався недослідженим. Тому ми поставили перед собою завдання оцінити біоелектричні параметри та можливості отримання біоелектрики із техногенно забруднених ґрунтів: розділяючих зелених смуг вздовж автомагістралей, а також, лісових та сільсько-господарських ділянок неподалік локальних автотрас.

Автотранспорт є основним джерелом забруднення ґрунту важкими металами (Lee et al., 1997; Ozaki et al., 2004; Kabadayi & Cesur, 2010). В дослідних ґрунтових зразках було проаналізовано вміст елементів, що становлять I клас небезпеки: свинцю (Pb), цинку (Zn), кадмію (Cd); елементів, що належать до II класу небезпеки: міді (Cu), хрому (Cr), нікелю (Ni), III класу небезпеки: ванадію (V), марганцю (Mn), а також титану (Ti) та сульфуру (S) (GOST 17.4.1.02-83, 2008). В безпосередній зоні біля світлофору та зупинки автотранспорту, виявлено перевищення вмісту цинку в 3.8 раз, в той же час, на віддалі 250 – 500 м перевищення вмісту цинку було нижчим, у 2.2 рази. Свинець, один з найбільш небезпечних екотоксикантів довкілля, джерелом забруднення якого є автомобілі, перевищує ГДК у 10.2 рази у 25-ти м зоні біля світлофору та переходу, в той час як на віддалі 250 – 500 м, перевищення складає 5.0 раз. Мідь в 19.7 та 14.0 перевищує нормативний рівень в ґрунті безпосередньо біля світлофору та на віддалі від нього. Вміст сірки перевищує гранично-допустимий рівень в 9.26 раз біля світлофору та в 6.7 раз на віддалі 250 – 500 м від нього (табл. 4.3.1).

Отже, на розмежувальних зелених смугах автотрас можна диференціювати зони різної концентрації поллютантів: інтенсивно забруднені ділянки безпосередньо біля світлофору, де на протязі цілого дня зупиняються та газують

автомобілі, та, зони помірного забруднення, на відстані більше 250 – 500 м від світлофору (табл. 4.3.1, 4.3.2).

Табл. 4.3.1 Вміст важких металів та сульфуру у зразках ґрунту розмежувальних смуг автотрас міста ($x \pm SE$, $n=10$)

Елемент	Вміст, у зразках г/кг		ГДК*
	0-25 м від світлофору	250-275 м від світлофору	
S	1.482±0.067	1.071±0.051	0.160
Ti	0.899±0.042	0.792±0.037	
V	0.034±0.001	0.031±0.001	0.150
Cr	0.021±0.001	0.017±0.001	0.006
Mn	0.249±0.012	0.173±0.007	0.140
Cu	0.059±0.002	0.042±0.001	0.003
Zn	0.087±0.004	0.051±0.002	0.023
Pb	0.061±0.002	0.030±0.001	0.006

* GN 2.1.7.12-1-2004, 2004; GN 2.1.7.2041-06, 2006; GOST 17.4.3.06-86, 2008; Pimenova, 2009

Дослідження Fukuzaki et al. (1986), Fauser et al. (1999), Adachia & Tainoshob (2004), Schauer et al. (2006) та Hjortenkrans et al. (2007) показали, що значні кількості Zn, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni у ґрунтах пов'язані з пилом від зносу шин. Серед них, Zn є найпоширенішим важким металом, що виділяється та нагромаджується у поверхневих шарах ґрунту від зносу шин, оскільки ZnO та ZnS додаються до шин під час вулканізації (Smolders & Degryse, 2002). Найбільший знос шин та вивільнення важких металів відбувається під час розгону, гальмування та поворотів автомобіля (Adamiec et al., 2016). Ще одне джерело дорожнього пилу – знос від гальмівних систем. Під час швидкого гальмування гальма піддаються значному нагріванню від тертя, яке передається на гальмівні диски і призводить до викиду частинок важких металів. Найбільш інтенсивне зношування гальм відбувається на перехрестях, кутах, світлофорі та шляхом примусового гальмування (Adamiec et al., 2016). Дослідження Blau (2001), Adachia & Tainoshob (2004) та Hjortenkrans et al. (2007) повідомляють, що гальмівний пил містить

значну кількість Cu, а також S, Ti, Zn, Ni, Cr і Pb та невелику кількість Cd. Крім мідного пилу зношених гальмівних систем автомобілів, джерелом забруднення міддю є тертя тролейбусних штанг об тролейбусні лінії. Результати Duong & Lee (2011) показують: концентрація важких металів у дорожньому пилу значно варіюється залежно від руху та особливостей дорожнього руху, таких як об'їзд, автомобільні дороги та світлофори, що співзвучно з отриманими нами даними.

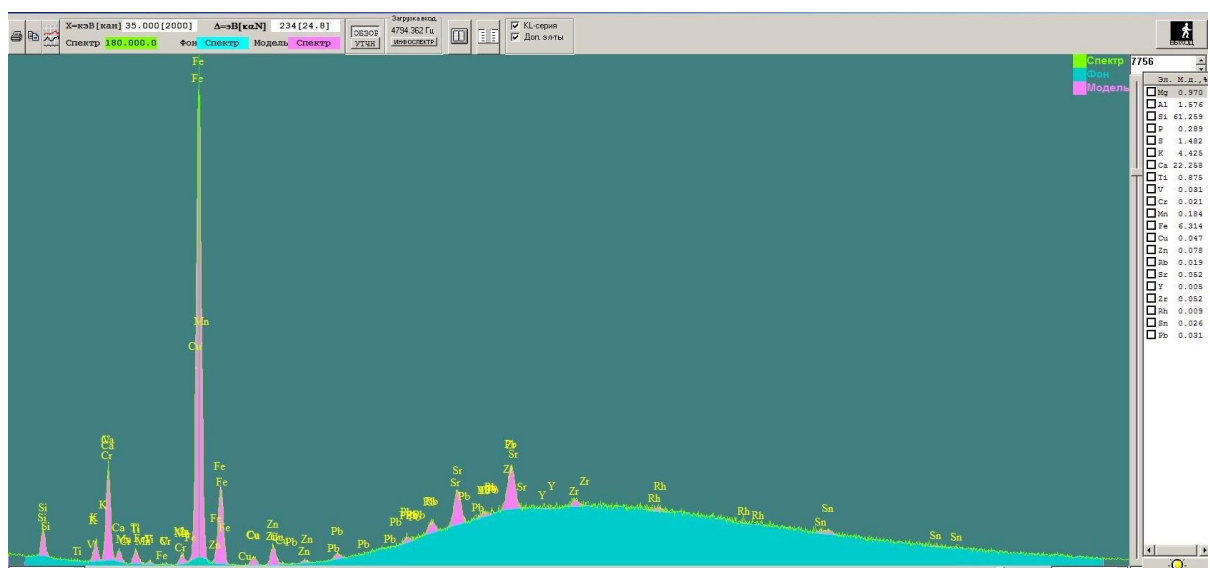


Рис. 4.3.2 Спектри елементів зразка ґрунту, забрудненого важкими металами

Було виявлено, що рівень напруги у рослинно-мікробних біосистемах газонів вздовж автотрас залежить від ступеню їх забруднення важкими металами. За однакових метеоумов: температури середовища, вологості субстрату, рівня освітлення, що мають важливе значення для рівня фотосинтетичної активності рослин та відповідно, біоелектропродуктивності асоційованих з ними електрико-генеруючих мікроорганізмів, контрольні чисті газони, розташовані на віддалі 500 м від автотрас, характеризуються статистично суттєво вищим рівнем біоелектричного потенціалу, ніж газони вздовж автотрас як з інтенсивним, так і помірним забрудненням ($P < 0.05$) (рис. 4.3.3). Різниця між середньою напругою рослинно-мікробних біосистем чистих газонів та інтенсивно і помірно забруднених складає 181.6 та 103.7 мВ, відповідно. І водночас, екосистеми газонів

помірно забруднених ґрунтів, характеризуються суттєво вищим рівнем напруги, ніж інтенсивно забруднені ($P < 0.05$) (рис. 4.3.3). Так, середня напруга біосистем помірно забруднених зелених газонів вздовж автосмуг перевищує на 77.9 мВ потенціал інтенсивно забруднених. При цьому, рівень біоелектричного потенціалу помірно забруднених смуг газонів, розділяючих автомагістралі є досить високим, що дозволяє використовувати їх як джерело біоелектрики. Середній рівень біоелектричного потенціалу зон газонів, розташованих на віддалі від 250 м від світлофору та зупинки автотранспорту становить 1002.4 мВ (рис. 4.3.3). Отримані нами показники є близькі до значень середнього напруги електро-біосистем з *Chlorophytum comosum*, де значення біоелектричного потенціалу коливались в діапазоні від 900 до 1100 мВ (Tou et al., 2019).

Виявлені в інтенсивно забрудненій зоні (біля зупинки автотранспорту) важкі метали, очевидно, виявляють токсичну дію на рослини, пригнічуючи ріст та фотосинтетичну активність трав у смугах вздовж автотрас, що позначається на зниженні їх біоелектропродуктивності біосистем. Рослини реагують на присутність важких металів зменшенням росту, фотосинтетичної активності, та, навіть загибелю. Відомо, що чутливі види, як наприклад, кормові боби, реагують зменшенням фітомаси на 12% вже на присутність у ґрунті Cu 50 мг/кг (в аналізованих нами зразках смуг газонів виявлено 59 мг/кг біля зупинки автотранспорту та 42 мг/кг міді на віддалі від неї) та 50%-ним зменшенням біомаси при вмісті Cu в дерново-подзолистому ґрунті > 200 мг/кг (Goncharova et al., 2010). Токсичний рівень Pb для вівса складає 50 мг/кг (Aryisheva et al., 2013). Водночас, в інтенсивно забруднених зразках автотрас виявлено 61 мг/кг свинцю.

Крім цього, очевидно, ефект важких металів поширюється і на всю мікробіоту смуг трав вздовж трас: важкі метали пригнічують активність нітрофікуючих бактерій, затримуючи мінералізацію нітрогену, і цим самим знижують ріст та фотосинтез рослин, а також, спричиняють загибель дощових черв'яків, що призводить до порушення структури ґрунту, порушується його водопроникність та водно-повітряний режим.

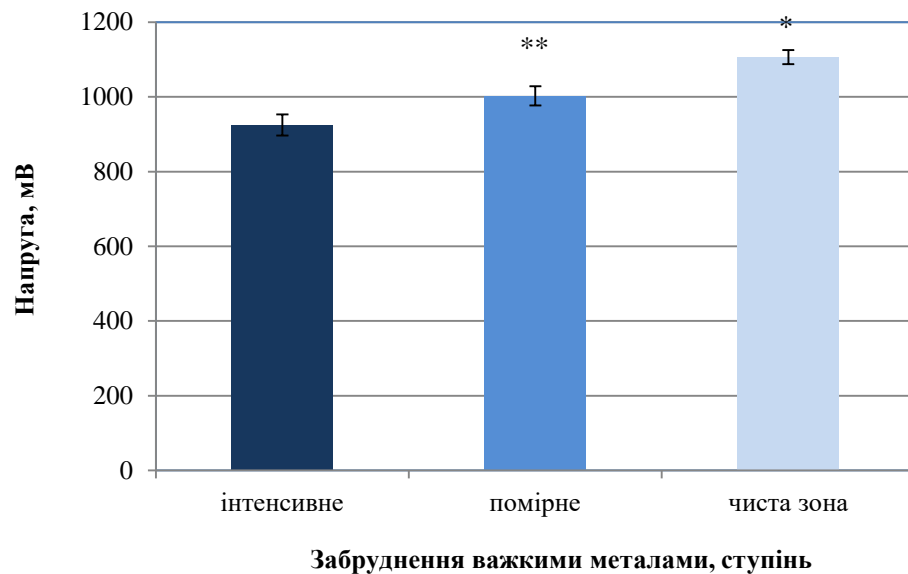


Рис. 4.3.3 Середня напруга біосистем в екосистемах газонів вздовж автотрас ($x \pm SE$, $n=10$).

*Фітомікробіоценози незабруднених газонів продукують суттєво вищу кількість біоелектрики в порівнянні із інтенсивно та помірно забрудненими газонами ($P < 0.05$).

** Напруга помірно забруднених газонів істотно перевищує потенціал інтенсивно забруднених територій ($P < 0.05$).

Розвиток мікроорганізмів та рослин в присутності забруднення важкими металами тісно залежить від рівня забруднення ґрунту, антропогенного навантаження на ґрунти та резистентності самих рослин. Істотна різниця в значеннях біоелектричного потенціалу між зонами інтенсивного та помірного забруднення пояснюється тим, що концентрація забруднення ґрунту є різною, тим самим створюються різні умови для розвитку електропродукуючих мікроорганізмів. Як безпосередньо, через негативний вплив токсичних важких металів на клітини електро-активних бактерій, так і опосередковано, через ефект на бактерії циклу нітрогену, дощові черв'яки, які мають вагоме значення для розвитку рослин, а також, через пригнічення токсичними сполуками самого

процесу рослинного фотосинтезу. Крім цього, рослини, які оточують електроди більше енергії витрачають на детоксикацію шкідливих частинок з атмосфери, а пил, який піднімають автомобілі покриває листя та стебла, через що рослина отримує менше прямого сонячного світла, необхідного для фотосинтезу, відповідно, падає рівень корневих виділень, які необхідні для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів. Оскільки розвиток всіх видів електро-активного мікробіому залежить від фотосинтетичної активності рослин (Strik et al., 2008; Deng et al., 2012; Wang et al., 2017), пригнічення фотосинтезу негативно впливає на розвиток асоційованих з ними мікроорганізмів.

Рослини характеризуються різною мірою стійкості до дії важких металів. Чутливість культур до надлишку важких металів варіює як між таксономічними групами, так і в межах навіть одного роду (Goncharova et al., 2012; Gomes, 2016). Ряд рослин мають захисні механізми, що дозволяють їм функціонувати в присутності важких металів (Borymski et al., 2018). Широко-поширений вид газонних міських трав *Festuca arundinacea* є резистентним до забруднення важкими металами, і зокрема, Pb (Khashi et al., 2018). Ефект важких металів в екосистемах, незважаючи на токсичність, залежить від їх концентрації. Зокрема, Pb, в малих концентраціях здатний проявляти навіть стимулюючу дію на ріст і розвиток рослин, зокрема, бобових (Aryisheva et al., 2013). Виявлені політанти в нижчій концентрації, як наприклад, свинець, 30 мг/кг у зоні 250 – 275 м від місця зупинки автотранспорту, в зоні помірного забруднення можливо, можуть теж сприяти росту рослин газонних трав та їх електро-генеративності. Рослини є толерантними до токсичного впливу важких металів, формуючи низку стратегій, які дозволяють їм подолати негативні наслідки токсичних елементів (Singh et al., 2016). Цим може бути пояснене виявлене нами незначне зниження електро-генеративності у зоні помірного забруднення 250 – 500 м від місця зупинки автотранспорту

Вплив факторів довкілля, таких як його температура, ступінь освітленості, кількість опадів і, відповідно, вологість ґрунту, на рівень генерації біоелектрики мікробно-рослинними біосистемами в зелених смугах вздовж автотрас міста з

різним ступенем забруднення важкими металами має складний характер. Наявність лише одного сприятливого фактору, як наприклад, сонячна безхмарна погода, чи висока вологість ґрунту, або сприятлива плюсова температура при наявності інших несприятливих факторах не призводять до генерації біоелектрики у високій мірі. Лише, при наявності цілого комплексу сприятливих факторів, відмічаються ріст біоелектричного потенціалу у всіх проаналізованих екосистемах газонів з різним ступенем забруднення важкими металами. Біосистеми газонів вздовж автотрас, на відміну, від лісових, садових, паркових екосистем, підпадають більш жорсткому впливу метеофакторів, тут відсутній сприятливий мутуалістичний вплив кореневої системи дерева, що створює окремий мікроклімат та підвищує адаптивні властивості екосистеми в простистоянні несприятливим погоднім умовам. Так, наприклад, при сприятливій температурі 23.2°C і 1) при сонячній погоді, оптимальній освітленості на протязі дня, 2000 Люкс (100%), але низькій вологості ґрунту 25.1%, чи 2) при похмурій погоді протягом дня, освітленні 700 Люкс (35%), але сприятливій високій вологості ґрунту, 75.4%, різниця біоелектричного потенціалу статистично незначна і складає 1.1 мВ і 15.5 мВ ($p > 0.077$) та 9.8 мВ ($p > 0.154$) для інтенсивно забруднених екосистем і помірно забруднених важкими металами та екосистем чистих контрольних газонів, відповідно (рис. 4.3.4). При встановленні одночасно, і оптимального рівня освітлення, 2000 Люкс (100%), і оптимальної вологості, 75.5%, при температурі 22.1°C, рівень біоелектричного потенціалу суттєво зростає в екосистемах газонів зелених смуг вздовж автотрас інтенсивно забруднених та помірно забруднених важкими металами ($P < 0.05$) та екосистемах чистих газонів вдалині від автотрас ($p > 0.657$) (рис. 4.3.4).

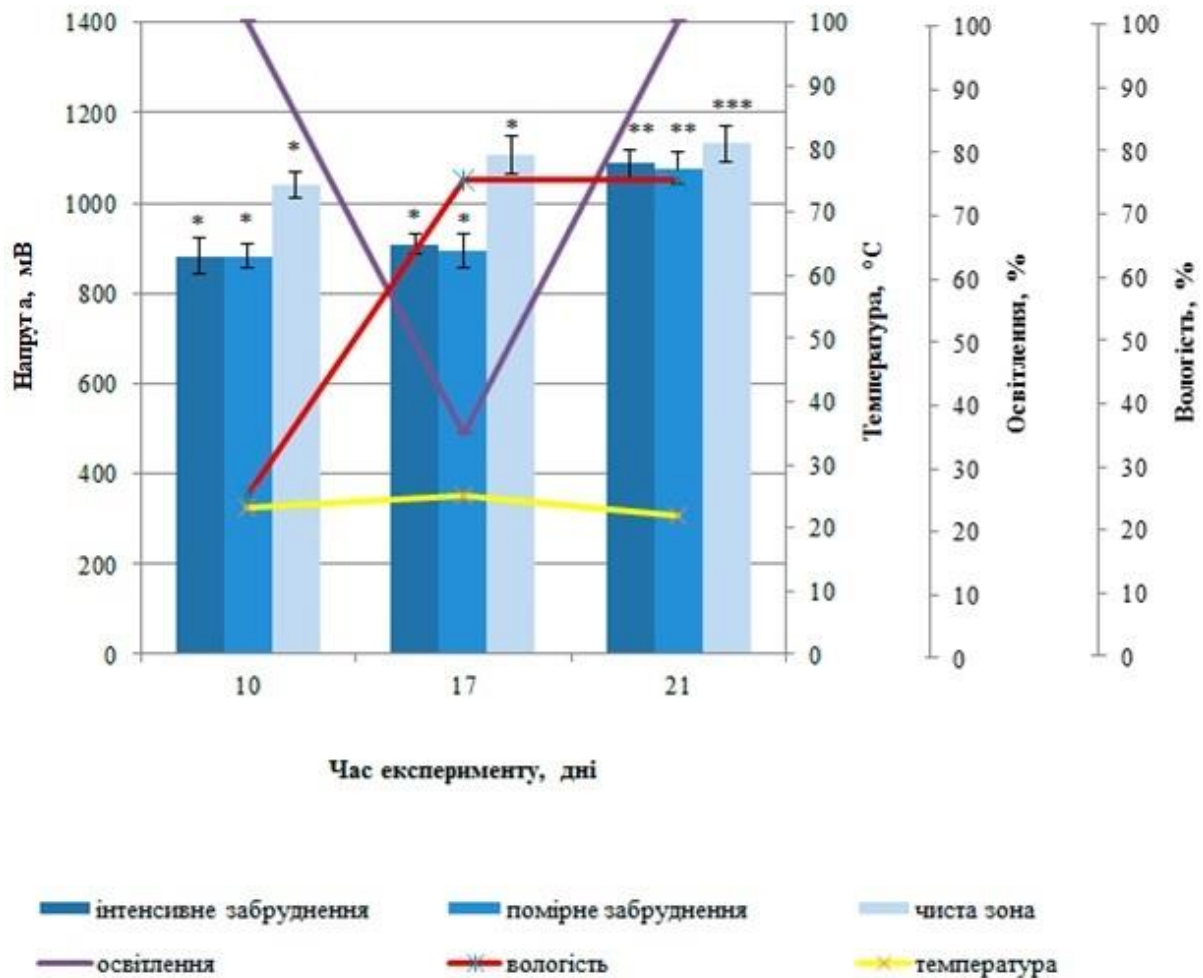


Рис. 4.3.4 Вплив вологості ґрунту, температури повітря та освітлення на генерацію біоелектрики біосистемами у газонах вздовж автотрас міста з різним ступенем забруднення важкими металами на протязі 21-ого дня експерименту ($x \pm SE$, $n=10$)

*Різниця між рівнем напруги біосистем при наявності одного несприятливого метеофактору: низькій вологості (25.1%) на 10-ий день експерименту чи низькому рівні освітлення (700 Люкс) на 17-ий день експерименту при оптимальній решті факторів довкілля є статистично несуттєвою ($P > 0.05$)

**Статистично достовірним є зростання напруги при встановленні сприятливого комплексу всіх досліджуваних факторів довкілля (2000 Люкс, вологість 75.5%, 22.1°C) в помірно та інтенсивно забруднених екосистемах газонів ($P < 0.05$) та

***статистично неістотною в чистих зонах ($P > 0.05$)

Проаналізувавши ділянки з різноманітним характером забруднення у містах

та сільській місцевості вздовж автотрас, виявлено, що 1) значне перевищення концентрації одного важкого металу, окрім елементів I групи небезпеки, як і 2) незначне перевищення ГДК декількох важких металів не є лімітуючим для отримання біоелектрики. Очевидно, електроактивні мікроорганізми, як в цілому всі мікроорганізми загалом, та газонні види трав рослин характеризуються високою адаптацією до різних несприятливих умов. Крім цього, незначне підвищення концентрації важких металів у ґрунтах, може мати і позитивну роль в генерації біоелектрики, оскільки може збільшувати провідність ґрунту та стимулювати ріст рослин та мікроорганізмів. Так, наприклад, в декількох зразках біля автотрас, де спостерігались досить високі середні значення біоелектричного потенціалу, 1101.6 ± 40.5 мВ, зафіксоване значне перевищення вмісту міді, в 33.0 раз від її ГДК, але при цьому сумарна кількість несприятливих впливів є помірною, перевищення норм решти важких металів є до 10 раз і це істотно не позначилось на біоелектропродуктивності біосистеми (рис. 4.3.5 С).

В той же час, в біосистемах в умовах, коли концентрація кількох небезпечних токсикантів значно перевищує норму – зареєстровані одні з найнижчих значень біоелектрики. Так, наприклад, в ґрунтах, де середня напруга складала лише 833.5 ± 301.5 мВ, рівень елементів I класу небезпеки кадмію і цинку, перевищував норму в 43.0 і 19.3 рази, відповідно, а міді, елементу II класу небезпеки, перевищував ГДК в 49.7 раз (рис. 4.3.5 D). Очевидно, значне перевищення вмісту кадмію та цинку, що належить до надзвичайно токсичних речовин I класу небезпеки, не могло не вплинути на розвиток бактерій та рослин, які визначають рівень біоелектропродуктивність екосистем. Зниження електропродуктивності спостерігалось також у зразках вздовж автотрас, з перевищенням вмісту цинку, елементу I класу небезпеки, в 14.1 раз, та міді, елементу II класу небезпеки, в 59.7 раз, свинцю, елементу I класу небезпеки, в 5.3 раз, тоді середня напруга складала лише 909.1 ± 25.9 мВ (рис. 4.3.5 E).

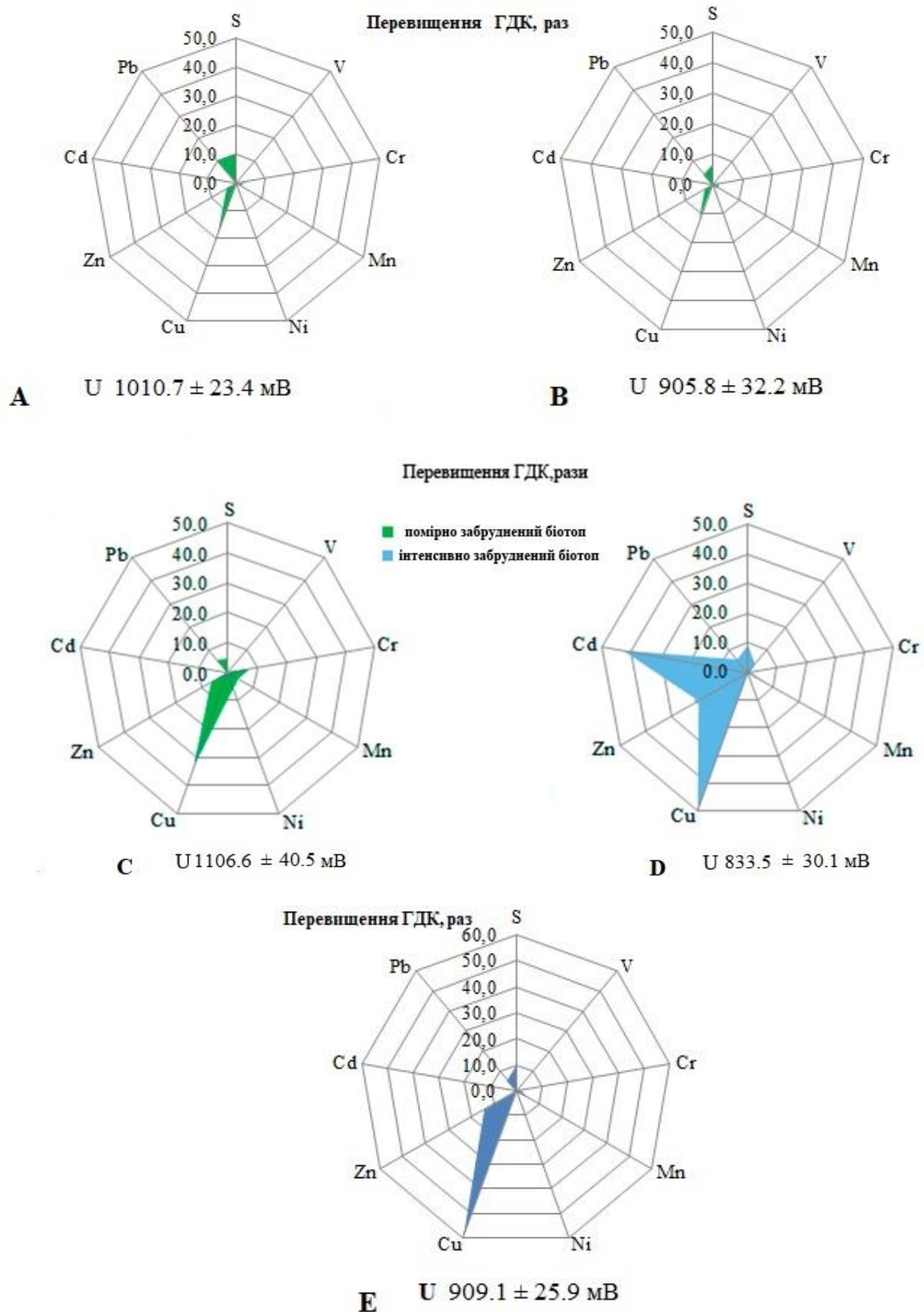


Рис. 4.3.5 Сумарний вплив важких металів I-III-ого класу небезпеки на генерацію біоелектрики техногенно забруднених фітомікробіоценозів вздовж автотрас ($x \pm SE$, $n=10$): (A, B, C) - помірно та (D, E) - сильно забруднених біотопів

В ще інших зразках газонних біосистем вздовж автотрас з низьким середнім рівнем біоелектрики нижче 1В, що складав 905.8 ± 32.2 мВ, рівень кількох елементів перевищував в 10 раз ГДК, в тому числі, вміст свинцю, елементу I класу небезпеки, в 10.5 раз, міді, елементу II класу небезпеки, в 18.2 раз, та сульфур у в 10.1 раз (рис. 4.3.5 А). В той час, середнє значення напруги понад 1В, 1010.7 ± 23.4 мВ зафіксовано в газонних біосистемах вздовж автотрас, де перевищення лише одного елементу II класу небезпеки, міді, є більшим, ніж в 10 раз і складає 12.1 раз, а перевищення вмісту інших елементів є нижчим 10 раз: елементів I класу небезпеки: свинцю в 4.5 рази, цинку в 2.6 раз, елементів II класу небезпеки: хрому в 2.5 раз, нікелю в 0.1 раз, елементів III класу небезпеки: ванадію в 0.2 раз, марганцю в 1.8 раз (рис. 4.3.5 В).

Біосистеми газонів зелених розділяючих смуг міських автомагістралей та сільськогосподарських земель поблизу локальних автотрас з помірним техногенним забруднення є досить стійкими до забруднення важкими металами, що перевищують ГДК навіть до 10 разів, якщо сумарна кількість екотоксикантів помірні і клас небезпеки елементів невисокий. Одночасно, вони є також резистентними до супутніх токсичних продуктів згоряння палива, що входять до складу викидів автомобілів: бензоапірену, бензантраценів тощо, які зазвичай є присутніми у високих концентраціях вздовж трас. Техногенно забруднені території є перспективним джерелом біоелектрики та можуть використовуватись для отримання з них біоелектрики після оцінки стану їх сумарного забруднення поліюантами та відповідного зонування територій за ступенем забруднення і визначення біоелектропродуктивних зон.

Подяка

Виявляю свою щирі подяку провідному конструктору Олександрі Медведєву за консультації, студенту екологу Володимирі Воронько за допомогу у реєстрації біоелектрики у газонних екосистемах міста, старшому викладачу кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного

університету «Львівська Політехніка» Пашуку А.В. за співробітництво при проведенні визначення вмісту важких металів і студентам-екологам Богдану Валько, Володимирі Воронько, Олександрі Патлатюку, Назару Стемпицькому, Ігорю Селецькому за технічну допомогу в експериментах та конструюванні систем збору біоелектрики

Матеріали підрозділу 4.3 представлені в патентах і наступних публікаціях

Русин, І.Б., Медведєв О.В., Воронько, В.В. & Пашук А. В. (2020). Вплив забруднення важкими металами на біоелектричний потенціал біотопів. *Екологічні науки*, 30, 53-59. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.9> **Index Copernicus International, фахове видання категорії В**

Висновки до розділу 4

Розкрито потенціал як джерела біоелектрики екосистем лісів, заболочених луків, агроекосистем фруктових садів та агрокультур *Z. maus*, урбоекосистем паркових та лісопаркових зон, а також, помірно техногенно забруднених газонів розділяючих зелених смуг вздовж автомагістралей міста. Середній рівень біоелектричного потенціалу в лісах становить 1080.5 ± 25.1 мВ, в садах 1055.3 ± 33.9 мВ, заболочених луках 1051.2 ± 31.5 та в парках і лісопарках 1041.8 ± 27.5 та 1076.7 ± 39.4 мВ, відповідно, помірно техногенно забруднених газонах 1002.4 ± 25.5 мВ. Біоелектрика фітомікробіоценозів агрокультур, інтенсивно забруднених газонів вздовж автотрас та біотопів занедбаних паркових зон з ущільненим ґрунтом внаслідок антропогенного навантаження та відсутнім трав'яним покривом довкола дерева була нижчою на 9.18%, 14.43% та 20.29% відповідно від біотопів екосистем лісу ($P < 0.05$) і становила 974.4 ± 27.4 мВ, 924.5 ± 28.1 мВ та 861.2 ± 34.2 , відповідно.

Інтенсивні органічні виділення дерев лісу, парків та садів з великою фосинтетичною поверхнею та потужнорозвинутими поверхневими кореневими системами, пов'язаними кілометрами мікоризи, у великій кількості рослинний опад та розвинутий нижній ярус рослинності, зімкнутість крон за відсутності щорічного зрушення ґрунту створюють оптимальні умови для розвитку електроактивних мікроорганізмів в умовах стабільних екосистем.

Виявлено ефект зниження напруги фітомікробіоценозів в міру віддалення від стовбура поодинокоростучого дерева без супутнього трав'яного покриву чи листяного опаду на віддалі від 1.5 м, ймовірно пов'язаної із зниженням максимальної концентрації горизонтальної кореневої системи в товщі ґрунту, органічні виділення якої зумовлюють електроактивність ґрунтових мікроорганізмів. Водночас, зміни напруги є незначними із віддаленістю від стовбура дерева у густих насадженнях дерев з молодими паростками дерев та листяним опадом через формування майже безперервних оптимальних зон розвитку мікроорганізмів завдяки накладанню і сумуванню корневих виділень

корневих систем віддалених сусідніх дерев, а також, безпосередньо паростків та продуктів розкладу органічного рослинного опаду. Виявлене явище асиметрії середньої напруги довкола дерев та наявність зон максимальної генерації біоелектрики дозволяє більш ефективно використання як джерела відновлювальної енергії насаджень дерев.

Коливання біоелектрики впродовж доби у досліджених фітомікробіоценозах є несуттєвими. Сезонні коливання рівня напруги у фітомікробіоценозах лісу, заболочених луків, садів та агроєкосистем, міських лісопарків та паркових зон є статистично незначними літом і осінню. *In situ* не виявлено чіткої залежності рівня напруги від рівня зволоженості ґрунту в усіх дослідних екосистемах. В багатьох випадках спостерігається істотний позитивний вплив вологості ґрунту на рівень біоелектричного потенціалу, в той же час, нерідким є факт суттєвого зростання рівня біоелектричного потенціалу в сухих ґрунтах, в ґрунтах з однаковою вологістю та при зниженні сухості ґрунту. Даний факт очевидно є ефектом фотосинтетично-залежної екскретивної активності рослин, для яких опади не є єдиним джерелом води. Рослини, функціонуючи без обмежень в широкому діапазоні умов та в залежності від цілого комплексу факторів, в тому числі інтенсивності сонячного світла, температури тощо, мають прямий вплив на генерацію біоелектрики через вплив на розвиток електрико-генеруючих мікроорганізмів та інших ризосферних мікроорганізмів.

Фітомікробіоценоз зелених смуг вздовж автотрас є високорезистентним до забруднення важкими металами, суттєве зниження їх біоелектропродуктивності спричиняється забрудненням лише одночасно кількома металами високого класу небезпеки, що перевищують ГДК більше як в 10 разів, що зустрічається лише на невеликому сегменті розділяючих зелених смуг вздовж автотрас.

Подальша розробка електробіотехнології відкриває можливості лісових екосистем, екосистем фруктових садів, насаджень окремих агрокультур, заболочених луків, урбанізованих територій паркових та лісопаркових зон міст та помірно техногеннозабруднених зелених розділяючих смуг вздовж автотрас як джерела поновлюваної та стабільної зеленої енергії. Біоелектрика екосистемами

може виступати важливим індикатором її стану, наявності несприятливих факторів довкілля та потреби рекультивації, застосування мір для її відновлення.

Література до розділу 4

- Adachia, K., & Tainoshob, Y. (2004). Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment International*, 30, 1009–1017. doi: 10.1016/j.envint.2004.04.004.
- Adamiec, E., Jarosz-Krzemińska, E., & Wieszala, R. (2016). Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 369–379. doi: 10.1007/s10661-016-5377-1
- Akhani, H. (2014). *Caltha palustris*. The IUCN Red List of Threatened Species 2014: e.T167915A42321925. doi:10.2305/IUCN.UK.20141.RLTS.T167915A42321925.en
- Arysheva, S. P., Dikarev, V. G, Geraskin, S. A., Dikareva, N. S., Sanzharova, N. I., & Udalova A.A. (2013). Produktivnost, morfologicheskie i fiziologo-biohimicheskie pokazateli bobov kormovyih, vyiraschennyih na zagryaznennoy svintsom pochve [Productivity, morphological, physiological and biochemical parameters of fodder beans grown on plumbum contaminated soil]. *Agrohimiya*, 2, 77–85 (in Russian).
- Aucina, A., Rudawska, M., Leski, T., Skridaila, A., Riepsas, E., & Iwanski, M. (2007). Growth and mycorrhizal community structure of *Pinus sylvestris* seedlings following the addition of forest litter. *Applied and environmental microbiology*, 73(15), 4867–4873. doi:10.1128/AEM.00584-07
- Banzhaf, H. S., & McCormick, E. (2007). Moving beyond cleanup: identifying the Crucibles of Environmental Gentrification. National Center for Environmental Economics. Working paper series 07/29. U.S. Environmental Protection Agency National Center for Environmental Economics, Washington.
- Barvinskyi, A. V., & Tykhenko, R. V. (2015). Otsinka i prohnoz yakosti zemel. [Land quality assessment and forecast]. Medinform, Kyiv (in Ukrainian).
- Baxter, J. W., & Dighton, J. (2001). Ectomycorrhizal diversity alters growth and nutrient acquisition of grey birch (*Betula populifolia*) seedlings in host-symbiont culture conditions. *New Phytologist*, 152, 139–149.

- Bedimo-Rung, A. L., Mowen, A. J., & Cohen, D. A. (2005). The significance of parks to physical activity and public health: a conceptual model. *American Journal of Preventive Medicine*, 28, 159–168. doi: 10.1016/j.amepre.2004.10.024
- Bertram, C., & Rehdanz, K. (2015). The role of urban green space for human well-being. *Ecological Economics*, 120, 139–152. doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.10.013
- Blau, P. (2001). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. Oak Ridge National Laboratory UT-Battelle. Report ORNL/M-5824 for U.S. *Department of Energy*, 3–24.
- Bodnar, V. O. (2016). Zahalna kharakterystyka lisiv ta lisovoho hospodarstva Ukrainy [General characteristics of forests and forestry of Ukraine]. Publichnyi zvit Derzhavnoho ahentstva lisovykh resursiv Ukrainy, Kyiv (in Ukrainian).
<http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/archive/docview?typeId=177276>,
http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=62921
- Borymski, S., Cycon, M., Beckmann, M., Mur, L. A. J. & Piotrowska-Seget, Z. (2018). Plant Species and Heavy Metals Affect Biodiversity of Microbial Communities Associated With Metal-Tolerant Plants in Metalliferous Soils. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1425, 1-18. doi: 10.3389/fmicb.2018.01425
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147–155. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006
- Braubach, M., Egorov, A., Mudu, P., Wolf, T., Ward Thompson, C., & Martuzzi, M. (2017). Effects of Urban Green Space on Environmental Health, Equity and Resilience. In: *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages between Science, Policy and Practice*. Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A., Eds., 187–205. Springer International Publishing: Cham, Switzerland.
- Cao, X., Onishi, A., Chen, J., & Imura, H. (2010). Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, 96(4), 224–231. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.03.008

- Crow, P. (2005). The influence of soils and species on tree root depth. Forestry Commission, Edinburgh.
- Dai, J., Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B. & Harris, J. R. (2010). Arboriculture & Urban Forestry. *Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees*, 36(4), 149–159.
- De Schampelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- De Jong, M., Joss, S., Schraven, D., Zhan, C., Weijnen, M. (2015). Sustainable – smart – resilient – low carbon – eco – knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 109, 25–38. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.004
- Deng, H., Chen, Z., & Zhao, F. (2012). Energy from Plants and Microorganisms: Progress in Plant–Microbial Fuel Cells. *ChemSusChem*, 5, 1006–1011. doi: 10.1002/cssc.201100257
- Denysyuk, N. (2018). Analiz stanu zelenykh nasadzhen Parku molodi mista Rivne [The analysis of the state greenery of Molody Park in Rivne town]. *Naukovyi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky, Serii: Biolohichni nauky*, 8 (381), 33–39 (in Ukrainian). doi:10.29038/2617-4723-2018-381-33-39
- Dobson, M. (1995). Tree root systems. Arboriculture Research and Information Note, 130. Arboricultural Advisory and Information Service, Farnham.
- Dzhura, N. M., Moroz, O. M., Rusyn, I. B., Kulachkovskyi, O. R., Tsvilyniuk, O. M., & Terek, O. I. (2010). Vplyv roslyn bobu kormovoho (*Vicia faba* var. *minor*) na funktsionuvannya mikrobnnykh asotsiatsii metabolizmu azotu v zabrudnenomu naftoiu grunti [Influence of fodder bean plants (*Vicia faba* var. *minor*) on the

- functioning of microbial associations of nitrogen metabolism in oil-contaminated soil]. *Hruntoznavstvo*, 11(3–4), 105–112.
- Duong, T., & Lee, B. K. (2011). Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 554–562. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.09.010.
- Eckerd, A. (2011). Cleaning up without clearing out? A spatial assessment of environmental gentri-fication. *Urban Affairs Review*, 47(1), 31–59.
- Eismont, V. S. (2014). Osoblyvosti budovy korenevoi systemy sosny zvychainoi na hruntakh z kamianystymy porodamy ta bez nykh v umovakh Tsentralnoho Polissia. [Features of the structure of the root system of pine trees on soils with and without rocky rocks in Central Polissya]. *Lisove i sadovo-parkove hospodarstvo*, 4, 1–7 (in Ukrainian).
- Eshel, A., & Beeckman, T. (2013). *Plant Roots: The Hidden Half*, Fourth Edition. CRC Press.
- European Environment Agency (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe – challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. European Environment Agency, Copenhagen.
- European Environment Agency (2016). *Urban adaptation to climate change in Europe 2016 – transforming cities in a changing climate*. European Environment Agency, Copenhagen.
- Fausser, P., Tjell, J. C., Mosbaek, H., & Pilegaard, K. (1999). Quantification of tire-tread particles using extractable organic zinc as tracer. *Rubber Chemical Technology*, 72, 969–977. doi: 10.5254/1.3538846.
- Fedoniuk, S., Kawalko, B., Kielbinska-Ryn, Z., Kowerski, M., Kuczabski, A., Malska, M., Matkowski, S., Miszczuk, A., Molas, W., Trochimczuk, S., & Zuchowski, W. (2005). *Pogranicze Polsko-Ukraińskie. Środowisko. Społeczeństwo. Gospodarka* [Polish-Ukrainian borderland. Environment. Society. Economy]. Zamosc: Wyższa Szkoła Zarządzania i Administracji w Zamosciu, (in Polish).
- Fedorovskyi, V. D., Terlyha, N. S., Yukhymenko, Yu. S., Danylchuk, O. V., Danylchuk, N. M., & Laptieva, O. V. (2013). *Vydovyi sklad ta zhyttievyyi stan derevno-*

- chagarnykovoi roslynnosti parkiv ta skveriv m. Kryvyi Rih. [Specific composition and vital status of arboreal -bushes vegetation of parks and green squares Kryvyi Rih town]. *Introduktsiia roslyn* 3, 73–79 (in Ukrainian).
- Fukuzaki, N., Yanaka, T., & Urushiyama, Y. (1986). Effects of studded tires on roadside airborne dust pollution in Niigata, Japan. *Atmospheric Environment*, 20, 377–386. doi: 10.1016/0004-6981(86)90041-7.
- Ganatsas, P., & Spanos, I. (2005). Root system asymmetry of Mediterranean pines. *Plant and Soil*, 278, 75–83. doi: 10.1007/s11104-005-1092-3
- Gomez, J., Yunta, F., Esteban, E., Carpena, R. O. & Zornoza, P. (2016). Use of radiometric indices to evaluate Zn and Pb stress in two grass species (*Festuca rubra* L. and *Vulpia myuros* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 23239–23248. doi: 10.1007/s11356-016-7546-8
- Goncharova, L. I., Manin, K. V., & Tsyigvintsev, P. N. (2012). Sravnenie chuvstivitelnosti rasteniy yachmenya i bobov kormovyih k zagryazneniyu medyu dernovo-podzolistoy pochvyi [Comparison of the sensitivity of barley plants and fodder beans to copper pollution of sod-podzolic soil]. *Agrohimiya*, 10, 66–71 (in Russian).
- Goncharova, L. I., Chizh, T. V., Muryigin Yu. V., & Gubareva O. S. (2010). Vliyanie zagryazneniya pochv medyu na rostovyye i biohimicheskie pokazateli rasteniy kormovyih bobov [The effect of copper pollution of soils on the growth and biochemical parameters of fodder bean plants]. *Agrohimiya*, 12, 58–62 (in Russian).
- GN 2.1.7.12-1-2004 (2004). Gigienicheskie normativyi. Perechen predelno dopustimyyih kontsentratsiy (PDK) i orientirovochno dopustimyyih kontsentratsiy (ODK) himicheskikh veschestv v pochve [Hygienic standards. The list of maximum permissible concentrations (MPC) and tentatively permissible concentrations (TPC) of chemicals in the soil]. Respublikanskiye sanitarnyye pravila, normyi i gigienicheskie normativyi. Ministerstvo zdavoohraneniya Respubliki Belarus, Minsk (in Russian).

- GN 2.1.7.2041-06 (2006). Rusakov, N. V., Kryatov, I. A., Tonkopiya, N. I., Gumarova, Zh. Zh., Pirtahiya, N. V., Veselov, A.P. Gigienicheskie normativyi. GN 2.1.7.2041-06. Predelno dopustimyye kontsentratsii (PDK) himicheskikh veschestv v pochve: Pochva, ochistka naselennykh mest, othodyi proizvodstva i potrebleniya, sanitarnaya ohrana pochvyi. [Maximum allowable concentration (MPC) of chemicals in the soil: Soil, cleaning up populated areas, production and consumption waste, sanitary protection of the soil] Federalniy tsentr gigienyi i epidemiologii Rospotrebnadzora, Moskva (in Russian).
- GN 2.1.7.2041-06 (2006). Rusakov, N. V., Kryatov, I. A., Tonkopiya, N. I., Gumarova, Zh. Zh., Pirtahiya, N. V., Veselov, A.P. Gigienicheskie normativyi. GN 2.1.7.2041-06. Predelno dopustimyye kontsentratsii (PDK) himicheskikh veschestv v pochve: Pochva, ochistka naselennykh mest, othodyi proizvodstva i potrebleniya, sanitarnaya ohrana pochvyi [Hygienic standards. GN 2.1.7.2041-06. Maximum allowable concentration (MAC) of chemicals in the soil: Soil, cleaning up populated areas, production and consumption waste, sanitary protection of the soil]. Federalniy tsentr gigienyi i epidemiologii Rospotrebnadzora, Moskva (in Russian).
- GOST 17.4.1.02-83 (2008). Mezhhgosudarstvennyiy standart. Ohrana prirodyi. Pochvyi. Klassifikatsiya himicheskikh veschestv dlya kontrolya zagryazneniya [Interstate standard. Nature protection. Soils. Classification of chemicals for pollution control]. Ohrana prirodyi. Pochvyi: Sbornik GOSTov. Standartinform, Moskva (in Russian).
- GOST 17.4.3.06-86 (2008). Mezhhgosudarstvennyiy standart. Ohrana prirodyi. Pochvyi. Obschie trebovaniya k klassifikatsii pochv po vliyaniyu na nih himicheskikh zagryaznyayuschih veschestv [Interstate standard. Nature protection. Soils. General requirements for the classification of soils in accordance with the impact of chemical pollutants on them]. Ohrana prirodyi. Pochvyi: Sbornik GOSTov. Standartinform, Moskva (in Russian).
- Haase, A. (2017). The Contribution of Nature-Based Solutions to Socially Inclusive Urban Development – Some Reflections from a Social-environmental Perspective.

- In Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages between Science, Policy and Practice. Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A., Eds., 221–236. Springer International Publishing: Cham, Switzerland.
- Hassen, A., Saidi, N., Cherif, M., & Boudabous, A. (1999). Resistance of environmental bacteria to heavy metals. *Bioresource Technology*, *64*, 7–15. doi: 10.1016/S0960-8524(97)00161-2
- Hjortenkrans, D. S. T., Bergback, B. G., & Haggerud, A.V. (2007). Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. *Environmental Science & Technology*, *41*, 5224–5230. doi: 10.1021/es070198o.
- Hroisman, V. (2017). Stratehiia udoskonalennia mekhanizmu upravlinnia v sferi vykorystannia ta okhorony zemel silskohospodarskoho pryznachennia derzhavnoi vlasnosti ta rozporiadzhennia nymy [Strategy to improve the mechanism to control the use and protection of agricultural land state property and disposal]. Kabinet Ministriv Ukrainy, Kyiv (in Ukrainian) (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/413-2017-%D0%BF>).
- Hryhora, I. M., Vorobiov, Ye. O., & Solomakha, V. A. (2005). Lisovi bolota Ukrainskoho Polissia (pokhodzhennia, dynamika, klasyfikatsiia) [Forest swamps of Ukrainian Polissya (origin, dynamics, classification)]. Fitosotsiotsentr, Kyiv (in Ukrainian).
- Huseynov, E. F. (2011). Planning of sustainable cities in view of green architecture. *Procedia Engineering*, *21*, 534–542. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2048
- Huz, M. M., Ozarkiv, I. M., Kulchytskyi-Zhyhailo, I. Ie., Ozarkiv, O. I., & Danchivska, O. Ia. (2009). Osoblyvosti budovy korenevoi systemy duba zvychainoho ta zakonomirnosti perenesennia volohy u derevi [Structural features of the root system of oak common and patterns of moisture transfer in a tree]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, *19*(4), 7–15 (in Ukrainian).
- Ilina, O.V. (2007). Bolota Volyni: osoblyvosti poshyrennia y antropohenni zminy [Volynia swamps: features of distribution and anthropogenic changes]. *Naukovi*

- pratsi Ukrainskoho naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu: Zbirnyk naukovykh prats, 256, 367–372 (in Ukrainian).
- Ivchenko, A. S. (2007). Bolotnyie massivyi Ukrainyi [Marshlands of Ukraine]. Bolshoy atlas mira. Geograficheskaya entsiklopediya. Amerkom Ukraina, Kyiv, 72, 333–336.
- Kabadayi, F., & Cesur, H. (2010). Determination of Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cd, and Mn in road dust of Samsun City. *Environmental Monitoring and Assessment*, 168, 241–253. doi: 10.1007/s10661-009-1108-1.
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., Artmann, M., Haase, D., Knapp, S., Korn, H., Stadler, J., Zaunberger, K., & Bonn, A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology & Society*, 21 (2), art39. doi: 10.5751/ES-08373-210239
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Karade, R. M., Kuchi, V. S. & Salma, Z. (2017). The Role of Green Space for Sustainable Landscape Development in Urban Areas. *International Archive of Applied Science & Technolgy*, 8, 76-79. doi:10.15515/iaast.0976-4828.8.2.5154.
- Khashij, S., Karimi., B., & Makhdoumi, P. (2018). Phytoremediation with *Festuca arundinacea*: A Mini Review. *International Journal of Health and Life Science*, 4(2), e86625. doi: 10.5812/ijhls.86625
- Kouzuma, A., Kaku, N., & Watanabe, K. (2014). Microbial electricity generation in rice paddy fields: recent advances and perspectives in rhizosphere microbial fuel cells. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 98(23), 9521–9526. doi:10.1007/s00253-014-6138-0
- Lee, P. K., & Touray, J. C., Baillif, P., Ildefonse, J. P. (1997). Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France. *The Science of the Total Environment*, 201, 1–15. doi: 10.1016/S0048-9697(97)84048-X.

- Li, L., Du, Q., Ren, F., & Ma, X. (2019). Assessing spatial accessibility to hierarchical Urban Parks by multi-types of travel distance in Shenzhen. *China International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*, 1038, 1–23. doi:10.3390/ijerph16061038
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, *172010*, 1–10. doi:10.1155/2013/172010
- Lovley, D. R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N. S., Shrestha, P. M., Flanagan, K. A., Akujkar, M., Butler, J. E., Giloteaux, L., Rotaru, A. E., Holmes, D. E., Franks, A. E., Orellana, R., Risso, C., & Nevin, K. P. (2011). Geobacter: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *Advances in Microbial Physiology*, *59*, 1–100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5.
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *195*, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Maimaitiyiming, M., Ghulam, A., Tiyp, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, U., Sawut, M., & Caetano, M. (2014). Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *89*, 59–66. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.12.010
- Maliuha, V. M., & Khryk, V. M. (2010) Skripliuvalni vlastyvoli korenevoi systemy sosny zvychainoi na yaruzhno-balkovykh zemliakh [The fastening properties of the root system of the pine tree on the ravine and girder lands]. *Naukovi dopovidi NUBiP*, *4* (20), 1–11 (in Ukrainian).
- Mauer, O., Houskova, K., & Mikita, T. (2017). The root system of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) at the margins of regenerated stands. *Journal of Forest Science*, *63*(1), 22–33. doi: 10.17221/85/2016-JFS
- Mokriienko, V. A., & Tsentylo, L. V. (2011). Osoblyvosti rostu i rozvytku kukurudzy zalezno vid strokiv sivby ta hustoty stoiannia roslyn. [Features of growth and development of corn, depending on the time of sowing and density of plants].

- Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Elektronne naukove fakhove vydannia, 3 (25) (in Ukrainian).
- Moore, G. M. (2019). Managing Urban Tree Root Systems. Proceedings of the 20th National Street Tree Symposium, 1–10, University of Adelaide's Waite Arboretum.
- Munzenberger, B., Gollack, J., Ullrich, A., Schmincke, B., & Huttli, R.F. (2004). Abundance, diversity, and vitality of mycorrhizae of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in lignite recultivation sites. *Mycorrhiza*, 14(3), 193–202. doi: 10.1007/s00572-003-0257-2
- Nowacka-Rejzner, U. (2019). Places for Green Areas in the Spaces of the Modern City. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471, 112087. IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/471/11/112087
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban For Urban Green Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3–4), 115–123. doi: 10.1016/j.ufug.2006.01.007
- Nguyen, V., & Nitisoravut, R. (2019). Bioelectricity generation in Plant Microbial Fuel Cell using forage grass under variations of circadian rhythm, ambient temperature, and soil water contents. Asia Power and Energy Engineering Conference, IEEE, Chengdu. doi: 10.1109/APEEC.2019.8720344
- Ostonen, I., Rosenvald, K., Helmisaari, H.-S., Godbold, D., Parts, K., Uri, V., & Lohmus K. (2013). Morphological plasticity of ectomycorrhizal short roots in *Betula* sp and *Picea abies* forests across climate and forest succession gradients: its role in changing environments. *Frontiers in Plant Science*, 4, 335. doi: 10.3389/fpls.2013.00335
- Ozaki H., Watanabe I., & Kuno K. (2004). Investigation of the heavy metal sources in relation to automobiles. *Water, Air, and Soil Pollution*, 157, 209–223. doi: 10.1023/B:WATE.0000038897.63818.f7.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., Montanarella, L. (2013). Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a

- European network. *Journal of Environmental and Public Health*, 158764, 11 pages. doi: 10.1155/2013/158764
- Picavet, H. S. J., Milder, I., Kruize, H., de Vries, S., Hermans, T., Wendel-Vos, W. (2016). Greener living environment healthier people?: Exploring green space, physical activity and health in the Doetinchem Cohort Study. *Preventive Medicine*, 89, 7–14. doi: 10.1016/j.ypmed.2016.04.021
- Pimenova, E. V. (2009). Normirovanie kachestva okruzhayushey sredyi i selsko-hozyaystvennoy produktsii [Rationing the quality of the environment and agricultural products]. Izd-vo Perm FGOU VPO «Permskaya GSHA», Perm (in Russian).
- Raudaskoski, M., & Salo, V. (2008). Dichotomization of mycorrhizal and NPA-treated short roots in *Pinus sylvestris*. *Plant Signaling & Behavior*, 3(2), 113–115. doi: 10.4161/psb.3.2.4972
- Rusyn, I. B. (2013). Urboekolohiia. [Urban ecology]. Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika», Lviv (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., Moroz, O. M., Karabyn, V. V., Kulachkovskyi, O. R., & Hudz, S. P. (2003). Biodehradatsiia vuhlevodniv nafty drizhdzhamy rodu *Candida* [Biodegradation of oil hydrocarbons by *Candida yeast*]. *Mikrobiolohichnyi zhurnal*, 65(6), 36–42.
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2016). Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybynnykh shariv gruntu [Biological method of producing bioelectricity from deep soil layers]. Patent of Ukraine 112093, filed March 9, 2016, issued December 12, 2016 (in Ukrainian).
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2016). Heavy Metal Tolerance in Plants: Role of Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, and Ionomics. *Frontier in Plant Science*, 6, 1143. doi: 10.3389/fpls.2015.01143
- Schauer, J. J., Lough, G. C., Shafer, M. M., Christensen, W. F., Arndt, M. F., DeMinter, J. T., & Park, J. S. (2006). Characterization of metals emitted from motor vehicles. Research Report. *Health Effects Institute*, 133, 1–76.

- Schultz, K. (2014). Dutch company powers streetlights with living plants; will your cell phone be next? Posted November 21, 2014, from: <http://www.yesmagazine.org/planet/dutch-company-powers-streetlights-with-living-plants-will-your-cellphone-be-next>.
- Shikhova, N. S. (2019). Assessment of the Functional State of Green Plantings and the Accumulation of Heavy Metals by Vegetation in Urban Green Areas for Various Purposes. *Contemporary Problems of Ecology*, 12(5), 502–513. doi: 10.1134/S1995425519050093
- Smolders E., & Degryse F. (2002). Fate and effect of zinc from tire debris in soil. *Environmental Science & Technology*, 36, 3706–3710. doi: 10.1021/es025567p
- Sorensen, M., Smit, J., Barzetti, V., & Williams, J. (1997). The role of urban parks for the sustainable city. *Journal of Landscape and Urban Planning*, 68, 128–138.
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. doi:10.1002/er.1397
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001.
- Sudirjo, E., Pim de Jager, Cees J. N., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2019). Performance and Long Distance Data Acquisition via LoRa Technology of a Tubular Plant Microbial Fuel Cell Located in a Paddy Field in West Kalimantan. *Indonesia Sensors*, 19, 4647, 1-18. doi:10.3390/s19214647
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, 74, 1271–1273. doi: 10.1271/bbb.90852
- Tender, L. M., Gray, S. A., Groveman, E., Lowy, D. A., Kauffman, P., Melhado, J., Tyce, R. C., Flynn, D., Petrecca, R., & Dobarro, J. (2008). The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, 179 (2), 571–575. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.123

- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schlöter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, *94*(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Tou, I., Azri, Y. M., Sadi, M. H., Lounici, H., & Kebbouche-Gana, S. (2019). *Chlorophytum* microbial fuel cell characterization. *International Journal of Green Energy*, *16*(12), 1–13. doi: 10.1080/15435075.2019.1650049
- Ueoka, N., Sese, N., Sue, M., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2016). Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, *06*(01), 10–15. doi: 10.4236/jsbs.2016.61002
- Wang, J., Song, X., Wang, Y., Bai, J., Li, M., Dong, G., Lin, F., Lv., Y., & Yan, D. (2017). Bioenergy generation and rhizodegradation as affected by microbial community distribution in a coupled constructed wetland-microbial fuel cell system associated with three macrophytes. *Science of the Total Environment*, *607*–*608*, 53–62. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.243
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, *83*, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006
- Wetser, K. (2016). Electricity from wetlands: Technology assessment of the tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode. Part two: PMFCs applied in wetlands. Wageningen University, Wageningen. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.006
- Zhao, M., Kong, Z.-H., Escobedo, F. J., & Gao, J. (2010). Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, *91*, 807–813. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.10.010

- Zhang, B., Xie, G.-D., Gao, J.-X., & Yang, Y. (2014). The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 37–43. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.03.003
- Zhang, F, Tian, L, & He, Z. (2011). Powering a wireless temperature sensor using sediment microbial fuel cells with vertical arrangement of electrodes. *Journal of Power Sources*, 196, 9568–9573. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.07.037
- Zinchenko, O. I., Salatenko, V. N., & Bilonozhko, M. A. (2001). Roslynnnytstvo. [Plant Growing]. Ahrarna osvita, Kyiv (in Ukrainian).
- Zuzuk, B. M., Kutsyk, R. V., Radko, O. V., Kulahina, M. A., & Serbin, A. H. (2007). Vilkha cira, vilkha bila *Alnus incana* (L.), Moench [Alder gray, alder white *Alnus incana* (L.), Moench]. Zhurnal Provizor, 8, 1-10 (in Ukrainian).

Розділ 5. Отримання біоелектрики біотехнологічними системами, базованими на *A. plantago-aquatica* всередині будівель

Розробка рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики для застосування всередині будинків для живлення приладів, що споживають від 40 - 50 мА і можуть бути фундаментом для розробки автономним систем живлення WiFi мікроконтролерів, які споживають 100 мА чи LED освітлення в енергоефективних будинках представляє великий інтерес. Тривале функціонування таких електро-біосистем саме в середині приміщень, вивчення впливу на їх ефективність рослин та бактерій як біологічних підсилювачів генерації біоелектрики є малодослідженим. Над отримання електрики з живих рослин та мікроорганізмів безпосередньо з ґрунту, місця їх існування протягом останніх 10 років активно працює багаточисельна група вчених в університетах та наукових інститутах Бельгії, Ірану, Китаю, Кореї, Нідерландів, Німеччини, Франції, США, Тайланду, Японії та багатьох інших країн світу (Strik et al., 2008; De Schamphelair et al., 2008; Kaku et al., 2008; Helder et al., 2010; Picot et al., 2011; Rothballer et al., 2011; Kuijken et al., 2011; Timmers et al., 2012; Liu et al., 2013; Lu et al., 2015, Wetser et al., 2015a; Rahimnejad et al., 2015; Moqsud et al., 2017; Nitisoravut & Regmi, 2017, Nitisoravut et al., 2017). Першим реальним прикладом впровадження рослинно-мікробної біоелектротехнології є проект компанії Plant-e Starry Sky. В 2014 році в Амстердамі у Нідерландах засвічено 300 придорожніх світлодіодних лампочок, використовуючи лише електрику, добуту з рослинно-мікробних угруповань довколишнього ґрунту (Schultz, 2014).

Проте, біотехнологія отримання електрики з живих рослин та мікроорганізмів поки що не має широкого впровадження, але розглядається як перспективна для широкого застосування для освітлення вулиць, забезпечення точок доступу WiFi, підзарядки мобільних телефонів, енергопотреб екотуризму (Helder et al., 2012; Wetser et al., 2015b). Фахівці бачуть майбутнє за енергетичними зеленими дахами. За умови вдосконалення технології, 100 м² рослинності зеленого даху зможе забезпечити енергією цілий будинок, який

споживає 2800 кВт*год на рік (Strik et al., 2011). Зелений покрив на даху будинку чи озеленення біля нього зможе вирішити одночасно питання енергозабезпечення будинку та забезпечити екологічне покриття будинку або озеленення його території. Крім цього, зелені дахи активно сприяють збереженню довкілля, оскільки суттєво зменшують в будівлях споживання енергії (Castleton et al., 2010), добутої традиційним шляхом, а це означає зменшення емісії газів, що є неодмінними супутниками при експлуатації невідновлювальних джерел енергії. Біоелектрика корневих виділень живих рослин, трансформована ґрунтовими мікроорганізмами є відновлювальною та екологічною чистою, при її отриманні відсутні викиди парникових газів та токсичних речовин, оскільки технологія полягає лише в зборі електронів, що циркулюють в ґрунті за допомогою поміщення в ґрунт систем їх збору (Strik et al., 2008).

На теперішній момент рослинно-мікробна біотехнологія має кілька проблем. Однією з них є проблема отримуваної низької потужності та коштовності використовуваних для збору електронів та протонів матеріалів (Helder et al., 2013a; Behera & Varma, 2016). Основні шляхи підвищення потужності мікробно-рослинних електро-біосистем:

- вдосконалення катодів та анодів (Picot et al., 2011; Chen et al., 2012; Helder et al., 2012; Nitisoravut, 2017; Wetser et al., 2017),
- експериментування з новими середовищами (Helder et al., 2011; Moqsud et al., 2015) .
- та новими рослинами (De Schamphelaire et al., 2008; Kaku et al., 2008; Helder et al., 2010; Timmers et al., 2010; Timmers et al., 2012; Hubenova & Mitov, 2012; Yadav et al., 2012; Liu et al., 2013; Lu et al., 2015; Oon et al., 2015; Wetser et al., 2015b; Regmi, 2016).

Наступною вагомою проблемою, з якою стикається біотехнологія використання енергії живих рослин та мікроорганізмів, є сезонне зниження потужності енергії, отримуваної на зелених дахах та заболочених лісах (Helder et al., 2013b; Daj et al., 2015). Падіння рівня біоелектрики в зимово-весняний період в зовнішніх умовах було зафіксоване в роботах (Helder et al., 2013b; Daj et al.,

2015): отримувана потужність на зелених дахах та бототистих місцях була значно нижчою 0.088 W/m^2 , ніж отримана в лабораторії потужність 0.440 W/m^2 . Проте, сезонного падіння біоелектрики можна уникнути, якщо озеленювати всі закриті тераси і балкони будинків, створювати масштабні зимові сади всередині приміщень і використовувати їх як джерело біоелектрики всередині будівель як альтернативу зеленим дахам чи додаткове джерело енергії в енергоефективних будинках, особливо в країнах з суворим чи засушливим кліматом. Це могло би стати способом вирішення проблеми енерговтрат в умовах *in situ* в зимовий період та мати значення для круглорічного отримання рослинно-мікробної енергії. Дослідження роботи електро-біосистем всередині зелених будинків протягом року має великий інтерес як малодосліджене у світі.

В цій роботі ми мали на меті розробити біосистему для енергоефективного будинку, один біомодуль якої може генерувати струм 40-50 мА, дослідити її ефективність на протязу року в різних умовах.

Ми поставили перед собою завдання:

- вибрати болотисті невибагливі рослини і дослідити можливість тривалого культивування цих рослин як компонента електро-біосистем в закритих умовах будівель: на закритих застаканованих терасах чи балконах або біля вікон, збираючи біоелектрику;
- оцінити функціональність розроблених нами систем електродів протягом тривалого часу у заболоченому середовищі;
- дослідити біоелектричні параметри біосистем та оцінити їх придатність для використання для отримання біоелектрики всередині будівель протягом тривалого часу;
- оцінити значення використання саджанців рослин і вплив росту рослин на електропродуктивність;
- вивчити вплив зовнішнього фактору, такого як, температура всередині приміщень на утворення біоелектрики;

- дослідити роль бактерій *Desulfovibrio sp.* для генерації біоелектрики біосистемами на закритих застелених зелених лоджіях, терасах та балконах.

5.1 Селекція рослинної біоскладової для електробиотехнології закритих приміщень

Вибір рослини для електробиотехнології є дуже важливим і визначає, наскільки ефективно вона буде працювати. При використанні однієї і тієї ж системи збору електрики, але з різними рослинами, вихід енергії відрізняється до 10 раз, так наприклад, в експериментах Helder із *Spartina anglica* отримувана потужність складала 0.222 W/m^2 , а з *Arundo anomala* в 10 раз менше, 0.022 W/m^2 (Helder et al., 2010). В літературі в біотехнологіях отримання біоелектрики із живих рослин, описано використання рису посівного *Oryza sativa* (De Schamphelaire et al., 2008; Kaku et al., 2008), тростянки аномальної *Arundinella anomala* і тростника гігантського *Arundo donax* (Helder et al., 2010), спартини англійської *Spartina anglica* (Helder et al., 2010; Timmers et al., 2010; Wetser et al., 2015b), лепешняка великого *Glyceria maxima* (Timmers et al., 2012), іпомеї водної *Ipomea aquatica* (Liu et al., 2013), тростника південного *Phragmites australis* (Wetser et al., 2015b).

Використовувані у біотехнологіях згадувані вище рослини є рослинами вологих місцезростань. При виборі рослини для біоелектротехнології та одночасно озеленення житлових приміщень будинків ми теж спрямували свою увагу на рослини боліт. Оскільки саме у заболочених умовах можливо найповніше зібрати біоелектрику, продукovanу рослинами та мікроорганізмами, бо до мінімуму зведене проникнення кисню до електродів та пов'язана з цим втрата циркулюючих електронів та протонів (Helder et al., 2012), а також, заболочені території є ідеальними для розвитку електрико-продукуючих мікроорганізмів (Lovley et al., 2011).

Вибір рослини для електробіотехнології ми проводили серед невибагливих, що не потребують особливого догляду, декоративних космополітичних рослин та в той же час багаторічних рослин вологих місцезростань. Багаторічні рослини, в порівнянні з однорічними, володіють активнішою секрецією органічних речовин в ґрунт (Lynch & Whipps, 1990; Kuzyakov & Domanski, 2000), що веде до нагромадження у прикореневій зоні ґрунту так званого ризодепозиту (Dennis et al., 2010), від розщеплення якого мікроорганізмами залежить продукування біоелектрики. Такою рослиною, що володіє всіма необхідними характеристиками, нами було обрано частуху подорожникову, інша її назва – частуха звичайна, або водний подорожник, *Alisma plantago-aquatica* (Crocker & Wilmer, 1914; Tsvelev, 1979). Сама назва рослини, *Alisma*, з кельтської, вода, позначає її місце існування: рослина зростає по берегах водойм і мілководді, на болотистих луках, в канавах, вологих місцях вздовж доріг та стежок, повсюдно подібно як сухопутний подорожник *Plantago major* (Tsvelev, 1981; Gubanov et al., 2002; Francis, 2006).

A. plantago-aquatica є багатолітньою трав'янистою рослиною, висотою до 60 см – 1 м (Tsvelev, 1981; Gubanov et al., 2002; Grigoryev, 2006), що дає підстави сподіватися на наявність потужного ризодепозиту. Рослина використовується в ландшафтному дизайні ще з 19-ого століття, її висаджують по краях ставків чи в заболочених місцях садів та парків (Grigoryev, 2006). Весною та на початку літа декоративність рослини створюють розетки листків, влітку до них додаються дрібні білі, деколи рожеві чи бузкові квіти, що з'являються на довгому квітконосі (Darbyshire et al., 2014). Водний подорожник, як і сухопутний подорожник, практично не потребує догляду. *A. plantago-aquatica* поширена по всіх континентах, як у північних регіонах Європи та Америки, так і у південних регіонах Африки і Австралії (Tsvelev, 1981; Grigoryev, 2006).

Таким чином, частуху подорожникову *A. plantago-aquatica* було обрано рослину для електро-біотехнології закритих терас та балконів, як таку, що

- розвивається в болотистих місцезростаннях, тобто в умовах ідеальних для продукції та збору біоелектрики;

- надає економічності біотехнології, бо не потребує створення особливих умов зростання та догляду, а взяття посадкового матеріалу з довкілля не представляє складності;
- завдяки багаторічності та утворенню великої наземної біомаси вірогідний високий ризодепозитний потенціал, що необхідний для продукування біоелектрики;
- декоративна рослина, що може виконувати естетичну функцію на закритих терасах та балконах;
- космополізм рослини дозволяє застосовувати її у біоелектричних системах по всьому світу.

5.2 Культивування *A. plantago-aquatica* в складі біосистем в приміщеннях на закритих балконах та терасах будинків

Наступним нашим завданням було з'ясувати, чи можливим є культивування частухи подорожникової всередині приміщень в контейнерах із системами електродів. Як показали наші дослідження, болотиста рослина *A. plantago-aquatica* здатна розвиватися в типових умовах приміщень будинків: круглорічно на опалюваних терасах чи безпосередньо в квартирах з додатковим освітленням або циклічно на неопалюваних закритих балконах та терасах у заболоченому субстраті палюдаріума із ранньої весни до середини осені та в контейнерах з системами анодів та катодів (рис. 5.2.1).

Результати спостереження за ростом рослин протягом весняно-літнього періоду у закритих умовах приміщень показали, що таке середовище є сприятливим для розвитку рослини: активно виростають нові листки, протягом перших двох тижнів кількість листків у контейнерах збільшилась практично вдвічі, протягом наступних двох тижнів, ще в середньому на 41.9 % (табл. 5.2.1),

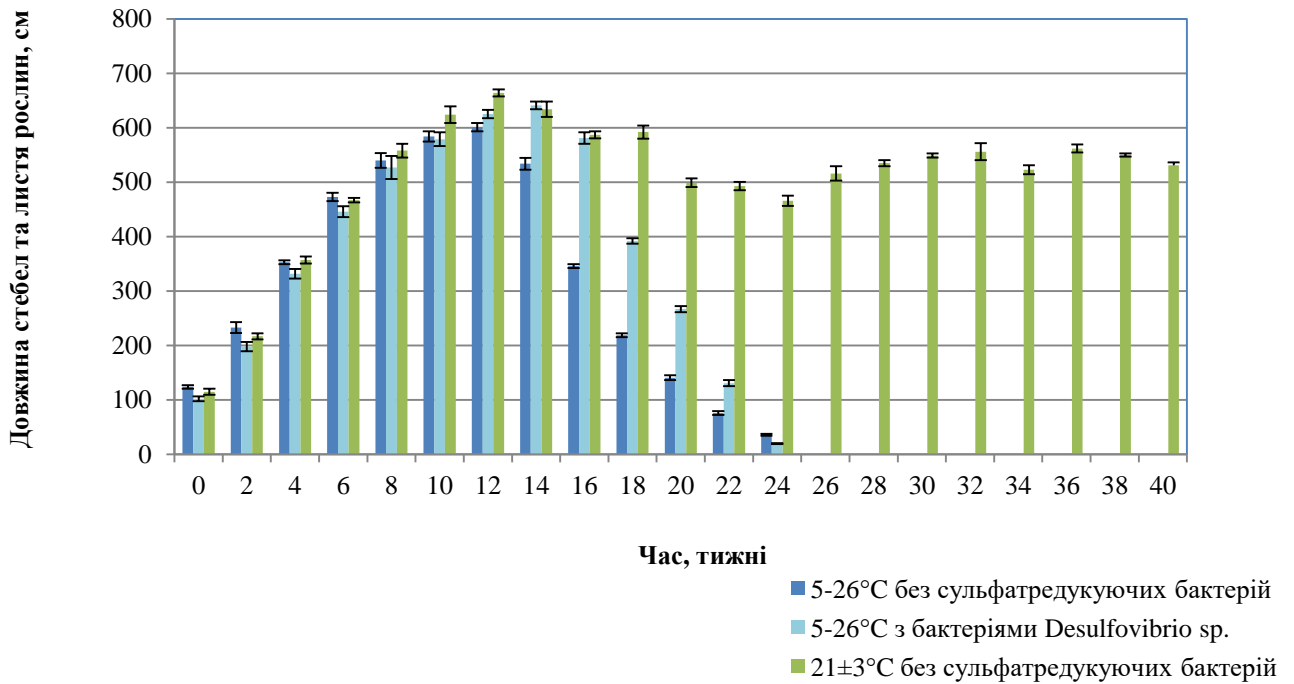


Рис. 5.2.1 Ріст *A. plantago-aquatica* в біоелектричних системах в приміщенні в різних умовах протягом 40-ка тижнів експерименту: середня сумарна довжина листя та стебел рослин біосистеми при різких температурних коливаннях від 5 до 26°C із додаванням сіркобактерій *Desulfovibrio sp.* і без них та при стабільному температурному режимі 21±3°C ($\bar{x} \pm SE, n=20$).

на протязі літа листкова біомаса наростає, рослини квітнуть (рис. 5.2.2 А – D). В осінній період із зниженням температури та скороченням світлового дня на неопалюваних терасах листки жовтіють та всихають і, незважаючи на появу молодих паростків, рослини гинуть (рис. 5.2.2 Е – F, табл. 5.2.1). В електробіосистемах з додаванням сіркобактерій кущі частухи подорожникової триваліший період залишаються багатолістими, пожовтіння та всихання листків відбувається на 4 тижні пізніше, ніж в контейнерах без бактерій (табл. 5.2.1). В той час, як біосистеми з бактеріями мають збережену всю листяну масу, біосистеми без додавання бактерій втрачають біля половини листяної маси та жовтіють і всихають.



Рис. 5.2.2 Розвиток рослин *A. plantago-aquatica* в складі біосистем. Рослини перенесені у травні із природних водойм у контейнери із субстратом та системами електродів та утримувались в типових умовах неопалюваних закритих балконів при різких температурних коливаннях 5 – 26°C:

(А) травень, 1-й місяць експерименту, кущі рослини ще досить молоді та мають по декілька невеликих листків, в середньому висота рослин сягає 21.2 см;
 (В) червень, 2-й місяць експерименту, кущі частухи подорожникової добре сформовані, мають по 7-8 листків, висота наземної частини в середньому становить 36.1 см; (С) липень, 3-й місяць експерименту, початок цвітіння частухи подорожникової; (D) вересень, 5-й місяць експерименту, цвітіння завершується, листя починає жовтіти; (Е) жовтень, 6-й місяць експерименту, листя рослин жовтіє та всихає; (F) листопад, 7-й місяць експерименту, незважаючи на наявність молодих листків, рослини загинули

Переміщення контейнерів з рослинами на початку осені і до початку весни в

теплі та добре освітлені зони приміщень і додаткове освітлення (12 год).

Табл. 5.2.1 Кількість і стан листків рослин *A. plantago-aquatica* в біосистемах із додаванням сіркобактерій *Desulfovibrio sp.* та без них ($x \pm SE, n=20$)

Час експерименту, тижні	Температурні умови та додавання сіркобактерій					
	5-26°C, без сіркобактерій	5-26°C, із сіркобактеріями	21±3°C, без сіркобактерій	5-26°C, без сіркобактерій	5-26°C, із сіркобактеріями	21±3°C, без сіркобактерій
	Середня кількість листків в одній біосистемі			Стан рослин		
0	6.1	5.3	6.0	***	***	***
2	11.7	10.2	11.2	***	***	***
4	14.9	15.6	16.3	***	***	***
6	16.7	16.8	17.6	***	***	***
8	16.6	17.5	17.8	***	***	***
10	15.9	17.4	18.4	***	***	***
12	16.7	19.8	19.5	***	***	***
14	14.5	18.5	18.3	**+	***	***
16	9.3	17.1	17.4	**+	***	***
18	6.2	16.7	17.2	*++	**+	***
20	4.1	10.6	17.7	*++	*++	**+
22	2.3	5.5	16.6	+++	+++	***
24	1.1	1.3	16.8	+++	+++	***
26	0	0	17.8	---	---	***
28	0	0	17.3	---	---	***
30	0	0	17.6	---	---	***
32	0	0	16.7	---	---	***
34	0	0	17.1	---	---	***
36	0	0	17.0	---	---	***
38	0	0	16.5	---	---	***
40	0	0	16.9	---	---	***

***Зелений колір листя; +++ Пожовтіння та всихання значної кількості листя; --- Загибель всіх рослин

попереджає загибель рослин і вони продовжують розвиватись цілу зиму (табл. 5.2.1). На опалюваних закритих балконах та терасах, біля зашкленних лоджій та вікон в квартирах, де температура не опускається з додатковим освітлення є можливим круглорічне культивування *A. plantago-aquatica* в складі біосистем (рис. 5.2.1). Частуха подорожникова розмножується насінням та поділом кореневища (Tsvelev, 1981; Gubanov et al., 2002), достатньо сильний самосів на протязі всього літа та проростання молодих кущів з кореневища забезпечують круглорічний зелений покрив палюдаріума з *A. plantago-aquatica*. Обслуговування системи просте та заключається в поливі 2 – 3 рази на тиждень

Отже, зашклені лоджії, балкони та тераси, які зазвичай, використовують для збільшення площі квартири, облаштування там зони відпочинку чи робочого місця, або, якщо вони не опалюються, то як буферної зони між квартирою та двором для зменшення витрат на обігрів, можуть виконувати ще одну важливу, енергетичну, функцію. Зашклений балкон чи тераса, де достатня кількість природнього світла, а за допомогою теплої підлоги чи радіаторного опалення підтримується стабільний температурний режим можна розглядати як повноцінний бокс для культивування болотяних рослин *A. plantago-aquatica* для отримання рослинно-мікробної енергії в квартирах.

5.3 Бюджетність біосистеми з *A. plantago-aquatica*

Показано функціональність запропонованої нами системи електродів (рис. 2.2.4) для збору біоелектрики протягом тривалого часу у водному середовищі – болотистому субстраті. Протягом експерименту, який тривав 40 тижнів, системи електродів функціонували справно і не потребували заміни. Запропонована нами система електродів нова (Rusyn & Medvediev, 2015; Rusyn & Medvediev, 2016; Rusyn & Medvediev, 2018), проста у виготовленні та бюджетна. В середньому вартість матеріалів для одної електро-біосистеми площею 0.0525 м² складає 6.71 Е при використанні вітчизняних складових або ж 31.70 Е при використанні придбаних у Європі матеріалів як показано в таблиці 5.3.1. Рослини для електро-

біосистеми можуть бути як отримані у розсадниках, так і взяті безпосередньо з природних водойм, оскільки рослина космополітична, широко поширена в заболочених місцях по всьому світу. Аналогічно, ґрунт для біосистем може бути використаний як придбаний в торговій мережі, так і отриманий з природного середовища. Це веде до ще більшого здешевлення системи, в цьому випадку вартість біосистеми складатиме 3.76 Е за умови використання вітчизняних складників та 25.09 Е при придбанні компонентів у європейських торгових мережах (табл. 5.3.1).

Таблиця 5.3.1 Вартість компонентів однієї біоелектрико-продукуючої біосистеми

Елемент біотехнологічної системи	Матеріал	Ціна, EUR	
		*Європа	**Україна
Контейнер	Поліпропілен	3.27	1.40
Католи	Графітові палички	15.30	0.52
Аноди	Оцинкована сталь	4.14	0.82
Провідники для з'єднання катодів	Мідні дроти	1.19	0.51
Провідники для з'єднання анодів	Мідні дроти	1.19	0.51
Рослина <i>Alisma plantago-aquatica</i>		4.70 (0.0)***	2.50 (0.0)***
Ґрунтовий субстрат		1.91 (0.0)***	0.45 (0.0)***
Вода		-	-
Загалом 1 біомодуль		31.70 (25.09)	6.71 (3.76)
Загалом м ²		634.00 (501.8)	134.2 (75.2)

* середня вартість в українських та ** європейських країнах станом на 2021 р,

*** використання розсади і ґрунту з довкілля)

Ціна матеріалів 1 м² біотехнологічної системи без вартості біоскладової та ґрунтового субстрату складає від 75.2 EUR за умови використання українських складників до 501.8 Е при використанні європейських матеріалів. Вартість 1 м² біотехнологічної системи з врахованою ціною ґрунтового субстрату та розсади, паростків рослин, 134.2 EUR та 634.0 EUR, відповідно українські/європейські компоненти. Електро-біосистема є досить бюджетною і її ціна є нарівні із вартістю 1 м² зелених біоелектричних дахів, Green Electricity Roof, що складає 632.3 EUR (Timmers et al., 2012).

Вартість збору однієї біосистеми, виходячи з вартості апаратного забезпечення для підключення її технічних складових: порізка плит, свердління отворів, при масштабі 10 000 електро-біосистем, буде несуттєвою і складатиме в середньому плюс 3.1 EUR /10.1 EUR (вартість українських/європейських апаратів, відповідно) до вартості матеріалів кожної електро-біосистеми. Інші технологічні елементи, необхідні для утилізації біоелектрики: перетворювач напруги, USB порт – ще додатково 3.7 EUR /10.7 EUR до вартості матеріалів електро-біосистем. Витрати на виготовлення системи електродів, вартість збору електро-біотехнологічної системи та монтаж готової системи є незначними.

5.4 Біоелектричні параметри біосистеми з *A. plantago-aquatica*. Генерація біоелектрики біосистемами в різних умовах

Середня напруга біосистем з частухою подорожничковою *A. plantago-aquatica* у внутрішніх умовах будинків на протязі 40-ти тижнів експерименту коливалася від 1.15 ± 0.027 В до 1.21 ± 0.023 В, а середня сила струму від 34.2 ± 0.57 до 44.6 ± 0.90 мА, в залежності від умов культивування, максимальні зареєстровані показники сили струму становили 58.6 мА із навантаженням 10 Ω та максимальні показники потенціалу 1.34 В без застосування зовнішнього опору.

В поляризаційних дослідженнях біосистем з *A. plantago-aquatica* напруга та густина потужності вивчався під дією зовнішніх резисторів від 10 Ω до 12к Ω . Напруга біосистем є близьким до 1 В при застосуванні резистора 12 000 Ω .

Максимальну густину потужності в цьому експерименті було зареєстровано на рівні $0.702 \text{ mWm}^{-2} \text{ PGA}$ при застосуванні $200 \text{ }\Omega$. Найвища густина потужності зафіксована при навантаженнях в діапазоні $50 - 1000 \text{ }\Omega$, як і описано Cheng et al. (2006). Робота біосистеми під короткотривалою дією зовнішнього опору представлена на рисунку (рис. 5.4.1).

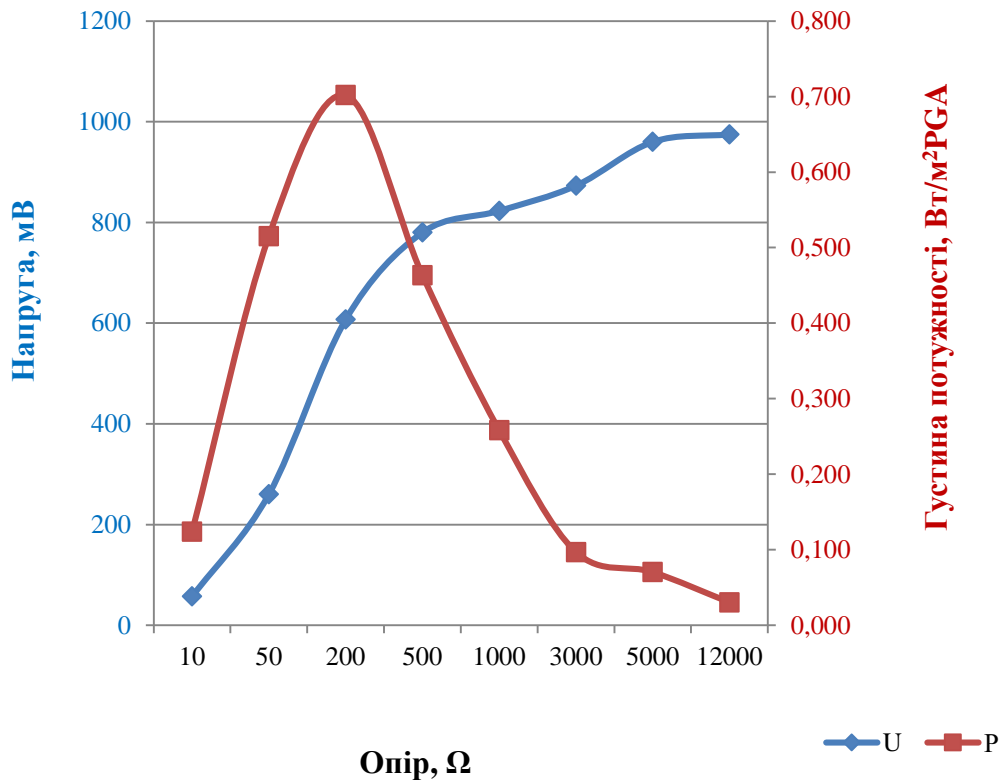


Рис. 5.4.1 Зміна напруги та густини потужності біосистем з *A. plantago-aquatica* під дією зовнішніх резисторів $10 \text{ }\Omega - 12 \text{ к}\Omega$. Напруга біосистем близька до 1 В при застосуванні резистора $12\,000 \text{ }\Omega$

Більш тривале застосування резисторів $200 \text{ }\Omega$ впродовж однієї чи двох діб приводило до зниження біоелектричного потенціалу з подальшим відновленням значень при усуненні резистора (рис. 5.4.2). Довготривала дія зовнішнього опору $200 \text{ }\Omega$ приводила до зниження біоелектричного потенціалу в середньому на 51.48% протягом доби та 58.27% протягом двох та більше діб (рис. 5.4.2). Після зняття зовнішнього резистора (відкриття кола) біоелектричний потенціал відновлювався

протягом доби і був на вихідному рівні через 2 доби (рис. 5.4.2). Значення біоелектричного потенціалу опускалися більше як удвічі до 436 мВ при застосуванні резистора більше двох діб та до 516 – 524 мВ при однодобому використанні резистора. Біоелектрична поведінка біосистем аналогічна до продемонстрованої (Hubenova and Mitov 2012, Wetser et al., 2015)

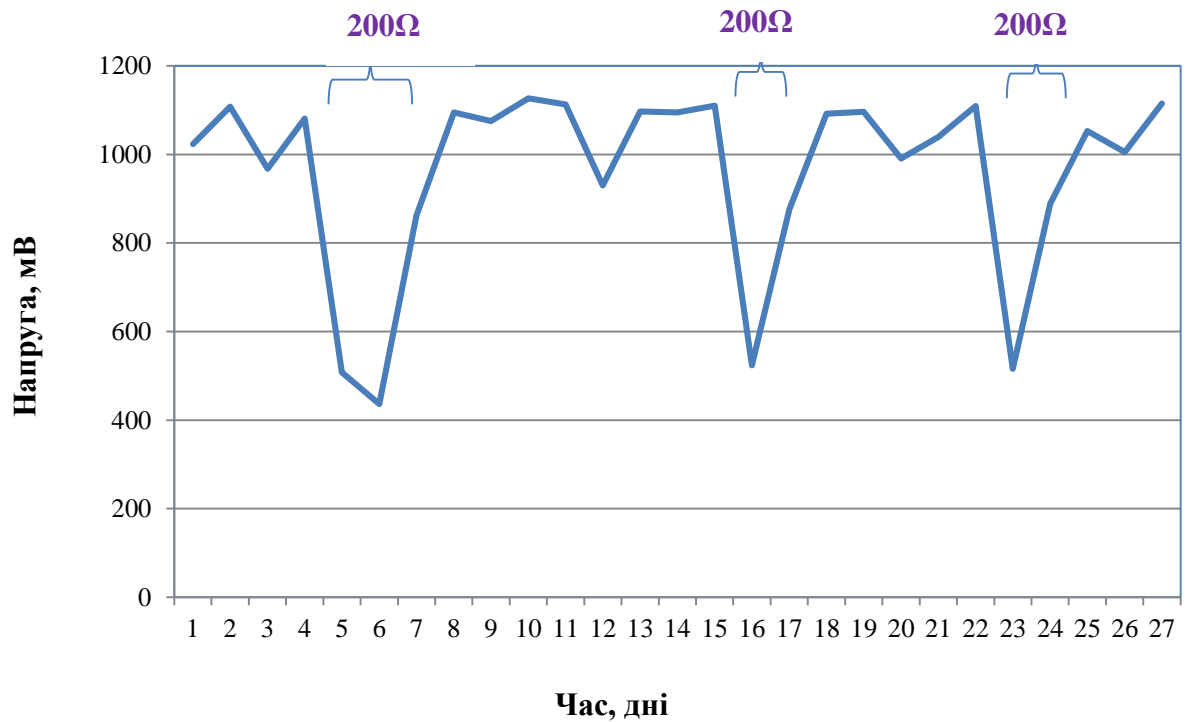


Рис. 5.4.2 Добовий та дводобовий вплив зовнішнього резистора 200 Ω на генерацію напруги біосистемою з *A. plantago-aquatica*

5.5 Час виходу біосистеми на середньорічні показники біоелектрики.

Значення використання саджанців рослин

Для створення біосистеми з *A. plantago-aquatica* пропонуємо використовувати саджанці молодих рослин, а не вирощувати рослини з насіння, таким чином біосистема працює вже з перших днів після монтажу. Ріст біоелектричного потенціалу і сили струму біосистем зафіксовано вже за кілька

днів від початку експерименту. Так, на початку експерименту сила струму в біосистемах, в середньому, становила 30.01 ± 0.72 мА та 29.65 ± 0.71 мА. Сила струму вище 40 мА встановлювалась вже через 2 дні від початку експерименту. На протязі перших двох днів експерименту сила струму у біосистемах зростала на 67.7 % і 65.3 % та становила 50.3 мА і 48.1 мА з додаванням суспензії сіркобактерій та без них відповідно. Середня сила струму із зовнішнім опором 10Ω на другий тиждень культивування складала $43.3 \pm 0.75 - 44.1 \text{ мА} \pm 0.84$ (рис. 5.5.1).

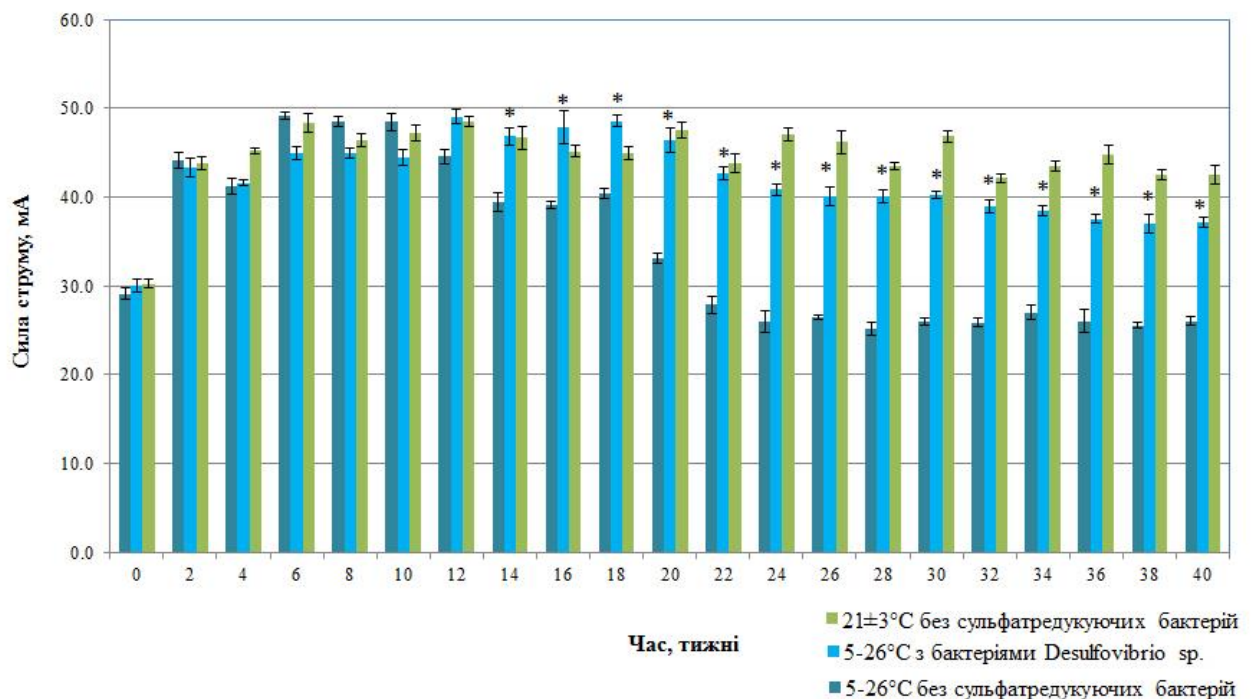


Рис. 5.5.1 Середня сила струму біосистем з *A. plantago-aquatica* (10Ω) на протязі 40 тижнів експерименту за різних умов: при температурних коливаннях від 5 до 26°C на неопалюваних терасах та балконах, із додаванням сіркобактерій та без них та при $21 \pm 3^\circ\text{C}$ на опалюваних балконах і терасах без сіркобактерій

($x \pm \text{SE}, n=20$)

*Збільшення струму при однакових температурних умовах є істотним при внесенні *Desulfovibrio* sp. ($P < 0.05$)

Середньорічний рівень напруги встановлювався в біосистемах в середньому за 2 тижні від початку експерименту (рис. 5.5.2). Зростання біоелектричного потенціалу від початку експерименту становило 14.05 %: від 9.4 % до 18.7 % в біосистемах з сіркобактеріями та без них за 2 тижні. Якщо на початку дослідження середня напруга становила 1040 – 1027 мВ, то вже за 2 тижні зростала до 1138 – 1213 мВ в біосистемах з *Desulfovibrio sp.* та без сіркобактерій.

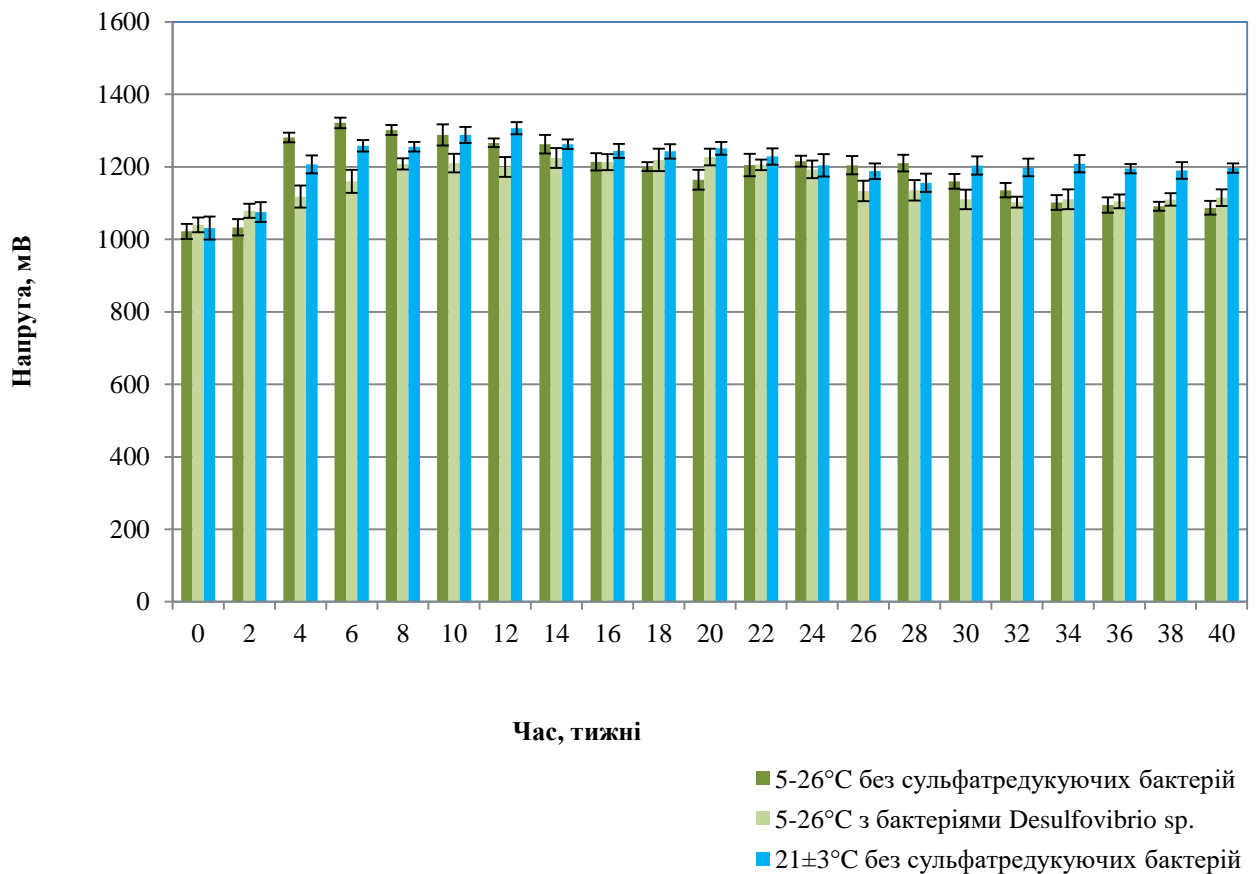


Рис.5.5.2 Середня напруга біосистем з *A. plantago-aquaticas* в без зовнішнього опору на протязі 40 тижнів експерименту в різних умовах: при температурних коливаннях від 5 до 26°C на неопалюваних терасах та балконах із додаванням сіркобактерій та без них та при 21±3°C на опалюваних балконах і терасах без сіркобактерій ($\bar{x} \pm SE, n=20$)

Час встановлення в біосистемі високих біоелектричних показників є коротким: вже за 2 дні показники сили струму зростає більше, як удвічі, а за 2 тижні біосистема працює практично на повну потужність.

5.6 Електропродуктивність біосистем в залежності від розвитку рослин

Спостерігається істотне збільшення показників біоелектрики з розвитком наземної частини рослин біосистем. Найбільш яскравим прикладом цього є біосистеми на неопалюваних терасах, де рослини проходять циклічний розвиток. Максимальні значення біоелектрики зафіксовані саме в літній період та початок осені, коли кущі рослин були найбільш розвинуті, містили максимальну кількість розвинутих зелених листків та були найбільш фотосинтетично активні (табл. 5.2.1., рис. 5.2.1). Кореляція росту рослин і генерації біоелектрики висока: коефіцієнт Пірсона складав від 0.67 до 0.96 в залежності від умов. Найвищі зафіксовані значення сили струму, вище 50 мА, біоелектричного потенціалу, вище 1.3 В спостерігались в електро-біосистемах на неопалюваних терасах протягом 6-ого – 20-ого тижнів експерименту в літній та початок осіннього періоду. Після загибелі рослин на неопалюваних терасах в біосистемах без сіркобактерій біоелектричні показники опускались майже до вихідних. Електро-продуктивність біосистем залежить від розвитку рослин: вона найвища у весняно-літній період та початок осіннього періоду, в час найбільшої фотосинтетичної активності рослин.

*5.7 Вплив температури та *Desulfovibrio sp.* на ефективність біосистем*

Одним з основних зовнішніх факторів, що мають вплив на розвиток рослин всередині будинків є температура довкілля. В житловому фонді широко поширеними є два типи приміщень, де багато місця для вирощування рослин всередині будівель: опалювані засклені балкони чи тераси, засклені лоджії, а

також закриті балкони і тераси, без опалення, де температура різко коливається в осінньо-зимовий період. Виявлено, що біосистеми є електропродуктивними в будинках кругорічно, але рівень продукування біоелектрики залежить від температурного режиму, в яких утримуються біосистеми та внесення сульфатредуючих бактерій.

На опалюваних терасах, де температура є весь час сприятливою для розвитку частухи подорожникової, сила струму біосистем не опускалася нижче 40 мА (рис. 5.5.1), сила струму та рівень біоелектричного потенціалу змінювались незначно і були лише дещо нижчими, на 3.88%, ніж в осінньо-зимовий період.

Біосистеми на неопалюваних балконах та терасах без додавання сіркобактерій були найбільш ефективними лише в весняно-літній період, а з 20-ого тижня експерименту із зниженням температури, загибеллю рослин біоелектричні показники падають. В біотехнологічних системах на неопалюваних терасах та балконах без додавання бактерій сила струму опустилася на вихідний рівень вже на 22-ий тиждень культивування (рис. 5.5.1), рівень напруги знизився майже до вихідного рівня на 40-ий тиждень експерименту (рис. 5.5.2).

В біосистемах на неопалюваних балконах та терасах, але з додаванням сіркобактерій, де хоч і температура виходила за межі, оптимальні для розвитку рослини, спостерігалася зовсім інша картина в генерації біоелектрики. На 26-й тиждень експерименту, коли біосистеми з сіркобактеріями перебували вже без рослинного покриву після загибелі рослин, середня сила струму у них складала 40 мА. Сам по собі заболочений субстрат з органічним опадом та доданими сіркобактеріями, очевидно, виступають індукторами генерації біоелектрики в цих умовах. Сила струму утримувалась вище 40 мА протягом 30-ти тижнів, і наступне її зниження було незначним, в порівнянні з біосистемою без бактерій в тих самих температурних умовах ($P < 0.05$) (рис. 5.5.1). Якщо протягом перших 20-ти тижнів позитивний ефект сіркобактерій на генерацію біоелектрики складав 1.04 раз (4.07%), то в період 20 - 40 тижнів наявність сіркобактерій посилювали біоелектричні параметри в 1.49 раз (32.83%). Очевидно, в перший період, визначальним фактором була наявність рослин та фотосинтетантів, а в другий

період, більш несприятливий, коли не надходили продукти фотосинтезу визначальними був вплив сіркобактерій.

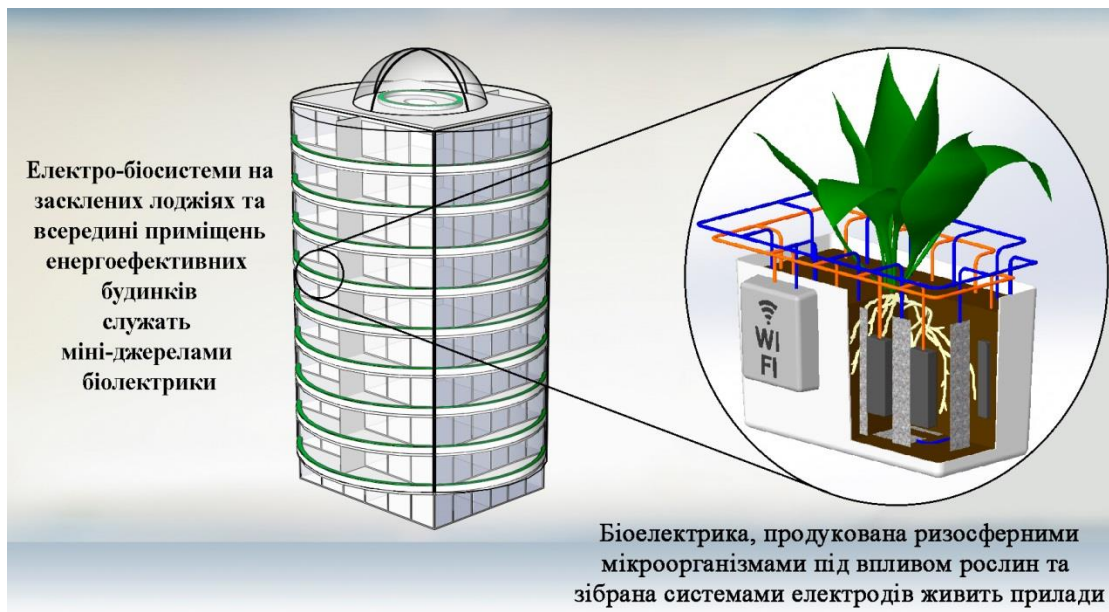


Рис. 5.7 Перспективи використання закритих лоджій житлового будинку для отримання рослинно-мікробної енергії через біосистеми з рослинами *A. plantago-aquatica*, зокрема, для живлення точок доступу Wi-Fi невеликого радіусу дії

Відмічений позитивний ефект *Desulfovibrio sp.*, як на розвиток рослин, так і на генерацію біоелектрики, можливо існує завдяки формуванню мутуалістичних взаємодій бактерій та рослин *A. plantago-aquatica*, а також створенню сприятливих умов для генерації електрики мікроорганізмами. Біоелектрика, яку можна отримати з контейнерів з рослинами – це результат активності електрико-продукуючих мікроорганізмів, які розвиваються, живлячись корневими виділеннями рослин (Helder et al., 2013b). Електрохімічна активність бактерій роду *Desulfovibrio* (Zheng et al., 2021), їх нітрогенфіксація (Beijerinck 1901) та редукція ним сульфату (Pfennig, 1989; Moroz & Rusyn, 2012) можуть відіграти ключову роль в максималізації збору біоелектрики. Мутуалістичний нітроген-обумовлений взаємозв'язок може сприятливо позначитись на рівні

фотосинтетичної активності рослин, що відповідно збільшить кількість екскреції коренями поживних речовин – субстратів для розвитку електрико-продукуючих мікроорганізмів. З іншого боку, сульфат, що може бути присутнім в заболоченому середовищі в невеликій концентрації, є небажаним для збору біоелектрики, так як виступає альтернативним акцептором електронів (Ivanov et al., 2017; Morris & Jin, 2009). Тому редукція сульфату *Desulfovibrio sp.*, сульфатредуючими бактеріями, виступає позитивним фактором в біотехнології отримання біоелектрики. А також, можливо, виділені у середовище метаболіти сіркобактерій можуть сприяти як розвитку електро-генеруючих бактерій, так і, безпосередньо брати участь в процесах отримання біоелектрики.

Хоч теоретично розраховані потенціально можливі у даній технології 3.2 W/m² (Strik et al., 2011) поки що недосягнуті, проте, ми на ще один крок ближче до цього досягнення з розвитком нової біосистеми *A. plantago-aquatica*. З використанням запропонованої нами біоелектротехнології генерація сили струму є стабільною протягом року при температурі 21±3°C в добре освітлених приміщеннях, закслених опалюваних терасах і балконах. Сезонний рівень редукції рівня біоелектрики становить 8.71%. На закритих балконах та терасах, що не опалюються, при температурних коливаннях 5-26°C генерація біоелектрики знижується в зимовий період в порівнянні з середніми значеннями весняно-літньо-осіннього періоду на 39.91% без сіркобактерій і на 19.98% із додаванням сіркобактерій. Таке зниження в генерації біоелектрики у зимовий період на закритих терасах та балконах є незначним у порівнянні із зафіксованим зниженням у зовнішніх умовах відкритого ґрунту зелених дахів у майже 5 разів (Helder et al., 2013b) чи припиненні генерації сили струму в заболочених лісах (Dai et al., 2015). Цей факт розкриває потенціал закслених зелених терас та балконів як джерела біоелектрики у зимовий період (рис. 5.7). Закслені лоджії будинків можна використовувати для вирощування болотистих рослин *A. plantago-aquatica* в складі біосистем з метою отримання рослинно-мікробної енергії для приладів, що споживають від 40мА.

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександру Медведєву за консультації і магістрам екологам: Христині Гамкало за допомогу в реєстрації параметрів біоелектрики та Богдану Валько і Назару Стемпіцькому за технічну допомогу в конструюванні систем збору біоелектрики для експериментів.

Висновки до розділу 5

Розроблено електробіотехнологію для отримання біоелектрики за допомогою біосистеми, що базована на рослині *Alisma plantago-aquatica* та природному біомі ґрунтових ризосферних мікроорганізмів в контейнері із природним заболоченим субстратом та графітово-оцинковано-стальною електродною системою для енергоефективних будинків всередині, їх застелених лоджій, терас і балконів. Болотиста рослина *A. plantago-aquatica*, що є широко поширена на всіх континентах була обрана як рослина для електробіотехнології. Довготермінове культивування рослини *A. plantago-aquatica* є можливим в складі біосистем всередині будинків, що дає змогу отримувати біоенергію з болотистого субстрату протягом всього року без значних зусиль на поновлення рослинного покриву чи його догляд. Біотехнологія ефективно працює з перших днів після інсталяції та практично на повну потужність через 2 тижні завдяки внесенню в субстрат саджанців рослин. Електропродуктивність біотехнологічних систем найвища у весняно-літній період та початок осіннього періоду в час найбільшої фотосинтетичної активності рослин. Показано високу кореляцію між генерацією біоелектрики та ростом рослин, коефіцієнт Пірсона становив від 0.67 до 0.98. Найвища зафіксована сила струму рівна 58.6 мА при зовнішньому навантаженні 10 Ω та максимальна потужність енергії 0.702 мВт м⁻² PGA при 200 Ω . Показано позитивний ефект *Desulfovibrio sp.*, як на розвиток рослин, так і на продукцію біоелектрики. Біотехнологічна система продовжує генерувати біоелектрику і після загибелі рослин та припинення їх фотосинтетичної активності завдяки активності електрико-генеруючих мікроорганізмів, ймовірно, за рахунок рослинного опаду та накопичених запасних речовин під індукцією бактерій

Desulfovibrio sp. Генерація біоелектрики біосистемою є стабільною з незначними коливаннями протягом року в добре освітлених та опалюваних приміщеннях при температурі $21 \pm 3^\circ\text{C}$ і сезонне зниження продукції біоелектрики в цих умовах рівне 8.71%. На закритих терасах та застелених балконах, що не опалюються, при різких температурних коливаннях від 5 до 26°C , продукція біоелектрики знижується в осінньо-зимовий період 39.91% без внесення сульфатредуючих бактерій та на 19.98% із додаванням сіркобактерій. Позитивний ефект сіркобактерій на генерацію біоелектрики був найбільш яскраво виражений з 20-ого тижня та складав 32.83%.

Запропонована для збору біоелектрики біосистема нова, проста у виготовленні та бюджетна, електроди витривалі у заболоченому середовищі та має хороші перспективи для подальшого вдосконалення для ще більш ефективного збору рослинно-мікробної біоелектрики. Догляд за біосистемою нескладний та доступний кожному без спеціальних навичок. Зелені сади, облаштовані на застелених балконах чи закритих терасах або ж зимові сади на останньому поверсі будинку є альтернативою чи додатковим джерелом електроенергії рослинно-мікробного походження до зелених дахів в країнах з суворим чи засушливим кліматом і вирішують проблему втрат біоелектрики в умовах *in situ* в холодні пори року. Хоч теоретично розрахована потенціально можлива у даній технології потужність енергії все ще недосягнута, проте запропонована біоелектротехнологія містить нові підходи та має прогрес у економічності, ефективності та круглорічному зборі біоелектрики. Ця електро-біосистема може бути під ґрунтям для розробки біосистем енергоживлення приладів, які споживають 50-100 мА та для LED-освітлення в середині будинків.

Матеріали розділу представлені в патентах і публікаціях:

- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R.** (2018). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62 (2), 170-179. doi:10.14232/abs.2018.2.170-179. **Scopus (Q3) та міжнародний журнал, Hungary**
- Мороз, О. М., & **Русин, І. Б.** (2012). Використання сполук нітрогену бактеріями циклу сульфуру озера Яворівське. *Мікробіологія та біотехнологія*, 2, 96-109. **Index Copernicus International, Advanced Sciences Index, фахове видання**

Література до розділу 5

- Behera, B. K., & Varma, A. (2016). *Microbial Resources for Sustainable Energy*. Springer International Publishing, Switzerland.
- Beijerinck, M. W. (1901). Uber oligonitrophile Mikroben [Oligonitrophile microbes]. *Zentralblatt fur Bakteriologie Parasitenkunde II*, 7, 561–582 (in German).
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy Buildings*, 42, 1582–1591. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004
- Chen, Z., Huang, Y. C., Liang, J. H., Zhao, F., & Zhu, Y. G. (2012). A novel sediment microbial fuel cell with a biocathode in the rice rhizosphere. *Bioresource Technology*, 108, 55–59. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.040
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, 40, 2426–2432. doi: 10.1021/es051652w
- Crocker, W. & Wilmer, E. D. (1914). Delayed Germination in Seed of *Alisma plantago*. *Botanical Gazette*, 58 (4), 285–321.
- Dai, J., Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- Darbyshire, I., Kordofani, M., Farag, I., Candiga, R., & Pickering, H. (2014). *The Plants of Sudan and South Sudan*. Kew publishing, Royal Botanic Gardens, London.
- De Schampelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- Dennis, P. G., Miller, A. J., & Hirsch, P. R. (2010). Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial

- communities? *FEMS Microbiology Ecology*, 72(3), 313–327. doi: 10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x
- Francis, R. (2006). *The wild flower key*. Penguin Books Ltd, London.
- Grigoryev, D. (2006). *Botanika. Entsiklopediya "Vse rasteniya mira"* [Botany Encyclopedia. All plants of the world: The translation from English]. Konemann, Verlagsgesellschaft (in Russian).
- Gubanov, I. A., Kiseleva, K. V., Novikov, V. S., & Tikhomirov, V. N. (2002). *Alisma plantago-aquatica* L. – Chastukha podorozhnikovaya [*Alisma plantago-aquatica* – Water plantain]. In Gubanov, I. A. et al. *Illyustrirovanny opredelitel rasteniy Sredney Rossii* [Illustrated determinant to plants of Middle Russia], Vol 1, Paporotniki, khvoshchi, plauny, golosemennyye, pokrytosemennyye (odnodolnyye) [Ferns, horsetails, moss, gymnosperms, angiosperms (monocotyledons)], 160, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, Institut tekhnologicheskikh issledovaniy, Moskva (in Russian).
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2011). New plantgrowth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 104, 417–423. doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.005
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, 5, 70. doi: 10.1186/1754-6834-5-70
- Helder, M., Chen, W. S., Van Der Harst, E. J. M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Buisman, C. J. N., & Potting, J. (2013a). Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, 7, 52–64. doi: 10.1002/bbb.1373

- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T, Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013b). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, *51*, 1–7. doi:10.1016/j.biombioe.2012.10.011
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2012). Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*, *87*, 185–191. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008
- Ivanov, R., Bratkova, S., & Angelov, A. (2017). Analysis of the efficiency of microbial fuel cells based on sulfate-reduction process, integrated in anaerobic wetlands. *Annuaire de l'Université de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Biologie*, *102* (4), 248-260.
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology & Biotechnology*, *79*(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Kuijken, R. C. P., Snel, J., Bouwmeester, H., & Marcelis, L. F. M. (2011). Quantification of exudation for the plant-microbial fuel cell. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, *76*(2), 15–18.
- Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000) Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *163*(4), 421–431. doi: 10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, *172010*, 1–10. doi:10.1155/2013/172010
- Lovley, D. R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N. S., Shrestha, P. M., Flanagan, K. A., Aklujkar, M., Butler, J. E., Giloteaux, L., Rotaru, A. E., Holmes, D. E., Franks, A. E., Orellana, R., Risso, C., & Nevin, K. P. (2011). Geobacter: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *Advances in Microbial Physiology*, *59*, 1–100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5.

- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *195*, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Lynch, J. M., & Whipps, J. M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, *129*(1), 1–10.
- Moqsud, M. A., Yoshitake, J., Bushra, Q. S., Hyodo, M., Omine, K., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, *36*, 63–69. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.004
- Moqsud, M. A., Gazali, T. A., Omine, K., & Nakata, Y. (2017). Green electricity by water plants in organic soil and marine sediment through microbial fuel cell. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *39*(2), 160–165. doi:10.1080/15567036.2016.1159263
- Morris, J. M. & Jin, S. (2009). Influence of NO₃ and SO₄ on power generation from microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, *153*, 127–130. doi: 10.1016/j.cej.2009.06.023
- Moroz, O. M., & Rusyn, I. B. (2012). Vykorystannia spoluk nitrohenu bakteriiamy tsyklu sulfuru ozera Yavorivske. [The use of nitrogen compounds by bacteria of the sulphur cycle of a lake Yavoriv]. *Mikrobiolohiia i Biotekhnolohiia*, *2* (18), 96–109. (in Ukrainian)
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 81–89. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.064
- Nitorisavut, R., Thanh, C. N. D., & Regmi, R. (2017). Microbial fuel cells: Advances in electrode modifications for improvement of system performance. *International Journal of Green Energy*, *14*(8), 712–723. doi: 10.1080/15435075.2017.1326049
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, *186*, 270–275. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.014

- Pfennig, N. (1989). Metabolic diversity among the dissimilatory sulfate-reducing bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 56, 127–138.
- Picot, M., Lapinsonniere, L., Rothballer, M., & Barriere, F. (2011). Graphite anode surface modification with controlled reduction of specific aryl diazonium salts for improved microbial fuel cells power output. *Biosensors & Bioelectronics*, 28, 181–188. doi: 10.1016/j.bios.2011.07.017
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745–756. doi:10.1016/j.aej.2015.03.031
- Regmi, R., Katechaimongkol, J., Deepang, C., Sawangareetagul, S., & Nitorisavut, R. (2016). Investigation of *Vetiver* grass for bioelectricity production and wastewater treatment in low cost earthen membraned microbial fuel cell. In: Proceeding of 6th International Conference SEE 2016 in conjunction with 6th International Conference ICGSI 2016 and 1st International Conference CTI 2016, 1–2, Bangkok, Thailand.
- Rothballer, M., Engel, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Schloter, M., & Hartmann, A. (2011). Comparison of bacterial rhizosphere communities from plant microbial fuel cells with different current production by 454 amplicon sequencing. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 76(2), 31–32.
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2015) Sposib priamoho otrymannia bioelektryky z gruntu [The method of obtaining bioelectricity from the ground]. Patent of Ukraine 98393, filed November 17, 2014, issued April 27, 2015 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2016). Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybyunnykh shariv gruntu [Biological method of producing bioelectricity from deep soil layers]. Patent of Ukraine 112093, filed March 9, 2016, issued December 12, 2016 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymannia bioelektryky iz konteineru z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodov [The method for bioelectricity

- obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).
- Schultz, K. (2014). Dutch company powers streetlights with living plants; will your cell phone be next? Posted November 21, 2014, from: <http://www.yesmagazine.org/planet/dutch-company-powers-streetlights-with-living-plants-will-your-cellphone-be-next>.
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. doi:10.1002/er.1397
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 86(3), 973–981. doi: 10.1007/s00253-010-2440-7
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 94(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Tsvelev, N. N. (1979). Rod Chastuha – *Alisma L.* [Genus *Alisma L.*]. In Fyodorov A. A., Gusev, Y. D. (Eds.). Flora evropeyskoy chasti SSSR [Flora of the European part of the USSR], Vol 4, 158–162, Nauka, Leningrad (in Russian).
- Tsvelev, N. N. (1981). Semeystvo chastukhovyye (Alismataceae) [Family Alismataceae]. In Takhtadzhyan, A. L. (Eds.) Zhizn rasteniy [Plant life], Vol. 6, Tsvetkovyye rasteniya, 12–17. Prosveshcheniye, Moskva (in Russian).
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015a). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137, 151–157. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.006

- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015b). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, *83*, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, *185*, 642–649. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122
- Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, *47*, 126–131. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.06.029
- Zheng, S., Li, M., Liu, Y., & Liu, F. (2021). Desulfovibrio feeding Methanobacterium with electrons in conductive methanogenic aggregates from coastal zones. *Water research*, *202*, 117490. doi: 10.1016/j.watres.2021.117490

Розділ 6. Біосистеми, базовані на *F. arundinaceae* як джерело біоелектрики та контейнерне озеленення в сучасних енергоефективних будівлях

Крім біосистеми, базованих на рослинах вологих місцезростань, здатних забезпечувати енергоживлення приладів 50 - 100 мА ми поставили завдання розробити аналогічні, але з рослинами мезофітами в універсальному ґрунтовому субстраті для використання у будинах всередині. Скляні стіни у сучасних новобудовах створюють прекрасні передумови для розвитку рослин. Будинки з вікнами на всю стіну, багатометровими зеленими терасами становлять великий сегмент новобудов. Якщо ще пару десятиліть тому, типовими були квартири лише з невеликими вікна, то тепер чи не кожна сучасна квартира має багатометрові скляні стіни, як через намагання здешевити будівництво, так і для практичного застосування останніх відкриттів про важливість світла для здоров'я людини та багатосторонній вплив світла на функції всього організму людини (Mead, 2008; Rusyn, 2016). Інтенсивне природне освітлення в сучасних квартирах сприяє активному розвитку рослин та дозволяє масштабне озеленення помешкань. Рослини у квартирах, крім, естетичної функції, участі в регуляції кисневого балансу можуть виступати джерелом електроенергії, яку виробляють ґрунтові бактерії, асоційовані з рослинами (Arends and Verstraete, 2012; Rusyn & Hamkalo, 2018; Sarma & Mohanty, 2018).

Отримання біоелектрики із контейнерів з рослинами полягає в конверсії корневих виділень рослин та відмерлої біомаси коріння електрико-генеруючими та синтрофними ґрунтовими мікроорганізмами (De Schamphelaire et al., 2008; Strik et al., 2008; Timmers et al., 2010). Нещодавно з допомогою рослинно-мікробіої енергії було частово заряджено мобільні телефони та засвічені світлодіодні лампочки, а перспективою є використання їх для більших енергоємних потреб (Strik et al., 2011; Helder et al., 2012; Lu et al., 2015; Wetser et al., 2015b, Gomora-Hernandez et al., 2020). Намагаючись розробити ефективніші біосистеми та більш дешеві варіанти і досягнути теоретично обрахований максимум у 3.2 W/m^2 , експерименти з різними типами біосистем, різними видами рослин, різними

системами електродів та субстратами, відомі з 2008 року продовжуються досі (Helder et al., 2010; Kuijken et al., 2011; Rothballer et al., 2011; Liu et al., 2013; Wetser et al., 2015a; Regmi et al., 2016; Moqsud et al., 2015; Moqsud et al., 2017, Arulmani et al., 2021, Apollon et al., 2023).

Значна частка робіт (De Schamphelaire et al., 2008; Kaku et al., 2008; Helder et al., 2010; Timmers et al., 2010; Hubenova & Mitov, 2012; Yadav et al., 2012; Liu et al., 2013; Lu et al., 2015; Oon et al., 2015; Wetser et al., 2015b) присвячені вивченню болотистих рослин для отримання біоелектрики, з метою отримання її на зелених дахах чи місць природного зростання рослин з використанням синтетичних чи модельованих болотистих субстратів. Проте ґрунтовий субстрат, в порівнянні із заболоченим субстратом, дозволяє розширити асортимент рослин біосистем, використовуваних в озелененні, здешевлює її бюджет, спрощує самостійну інсталяцію та обслуговування біоелектрогенераторних систем.

В зв'язку з цим, в нашій роботі ми поставили собі за мету розробити біосистему з доступних нових складових: неболотистих рослин, універсального ґрунтового субстрату та дешевої електродної системи та проаналізувати можливість та перспективи використання таких біосистем для приміщень будинків. Як біологічний компонент біосистеми ми обрали газонну траву, яка є невибаглива та проста у догляді. Інтер'єри з із звичайною травою у квартирах є лаконічними і простими та є модною тенденцією, що дозволяє мешканцям мегаполіса відчувати себе частиною природи. Трав'яний зелений покрив в умовах квартири є круглорічним (Robson & Jewiss, 1968), на відміну від відкритих місцезростань в країнах північних широт, що дозволяє отримувати біоелектрику незалежно від погодних умов.

Завданнями роботи було:

- проаналізувати особливості виду трави *F. arundinacea* як біокомпонента електробіотехнології;
- вивчити динаміку продукування біоелектрики біосистемою в залежності від розвитку рослини, від моменту посіву насіння *F. arundinacea* і до досягнення максимальної зеленої біомаси;

- вивчити можливість цілорічного функціонування біоелектричної системи з *F. arundinacea*.

6.1 Продукування біоелектрики біосистемою, базованою на *F. arundinacea*.

Генерація біоелектрики в залежності від розвитку рослин

Спостерігаючи за показами сили струму і напруги відкритого кола рослинно-мікробних біосистем від моменту їх інсталяції та протягом наступних 3 місяців можна виділити декілька періодів поетапного зростання біоелектричних показників, що корелюють з фазами розвитку рослин: проростанням насінин, появою перших паростків та активним розвитком рослин (рис. 6.1.1, 6.1.2).

Коефіцієнт Пірсона показує високу кореляцію розвитку рослин і генерації біоелектрики біосистемою і складає 0.85.

1-й період включає перші дві доби від моменту інсталяції біотехнологічної системи. Біоелектрична система працює вже з перших хвилин завдяки активності ґрунтових мікроорганізмів, але в цей час її біоелектричні показники невисокі. На момент інсталяції системи сила струму становить в середньому біля 0.21 мА. На протязі першої та другої доби значення біоелектричних показників суттєво зростають в порівнянні з наступними днями аналізу. Вже через дві доби рівень продукуючої біоелектрики практично сягає половини від середньорічних значень. Через добу сила струму зростає на 38.67 % і наступної доби ще на 31.23 %. На третю добу сила струму вища у 2.37 раз від значення першої доби та становить 23.02 мА супроти початкового значення 9.71 мА (рис. 6.1.1).

Зростання напруги відкритого кола є менш значною, в порівнянні з ростом сили струму: на 11.58 % за першу добу та на 3.62 % за другу добу. Через дві доби напруга у 1.17 раз вища, ніж на початку та становить 1048 мВ (табл. 6.1.1).

1-й період можна охарактеризувати, як початковий період адаптації. Зростання біоелектричних значень в цей період, ймовірно, зумовленими кількома факторами: 1. колонізацією електродних систем ґрунтовими мікроорганізмами та

2. просіданням ґрунту, в результаті чого його більш щільного контакту з електродами, розміщеними в ґрунті.



Рис. 6.1.1 Генерація сили струму біотехнологічною системою із *F. arundinacea* протягом перших 3 місяців після її інсталяції ($\bar{x} \pm SE, n=20$).

В динамічній картині сили струму можна виділити декілька періодів зростання показників, що корелюють з фазами розвитку рослин.

*Середній струм починаючи з 20-ого дня експерименту і розвитком перших паростків, є статистично значимо вищим в порівнянні з середнім струмом фази проростання насіння ($P < 0.05$)

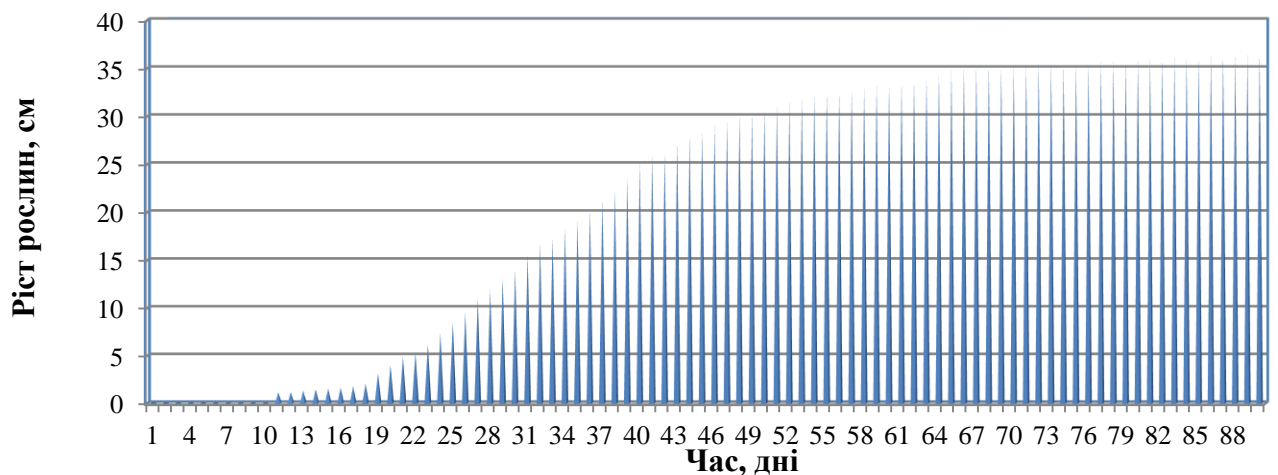


Рис. 6.1.2 Розвиток рослин *F. arundinacea* протягом 90-ти днів після інсталяції ої електрогенеруючої біосистеми включає кілька етапів: 0 –10-ий день: фаза проростання насіння; 11-ий – 20-ий дні: фаза появи перших паростків; 21-ий – 90-ий день: фаза активного росту біомаси

Як відомо, електроактивні мікроорганізми кріпляться до твердих предметів, формуючи нановолокна, які відіграють ключову роль у формуванні біоелектричного потенціалу (Lovley et al., 2011).

Табл 6.1.1 Напруга відкритого кола біотехнологічної системи із *F. arundinacea* протягом перших 3-ьох місяців після її інсталяції ($x \pm SE$, n=20).

Дні	Напруга, мВ	Дні	Напруга, мВ	Дні	Напруга, мВ
вих	482 ± 20				
1	893 ± 31	31	1046 ± 46	61	1095 ± 26
2	1010 ± 29	32	1050 ± 37	62	1089 ± 35
3	1048 ± 35	33	1048 ± 42	63	1081 ± 30
4	1054 ± 34	34	1051 ± 28	64	1093 ± 24
5	1045 ± 41	35	1057 ± 25	65	1105 ± 42
6	1046 ± 25	36	1048 ± 32	66	1116 ± 48
7	1045 ± 32	37	1032 ± 34	67	1125 ± 39
8	1039 ± 21	38	1051 ± 39	68	1120 ± 34
9	1034 ± 26	39	1058 ± 42	69	1136 ± 35
10	1027 ± 34	40	1061 ± 30	70	1132 ± 29
11	1029 ± 38	41	1064 ± 23	71	1138 ± 32
12	1040 ± 35	42	1071 ± 26	72	1124 ± 34
13	1041 ± 44	43	1060 ± 41	73	1143 ± 37
14	1050 ± 24	44	1069 ± 36	74	1135 ± 24
15	1045 ± 30	45	1073 ± 34	75	1137 ± 30
16	1049 ± 45	46	1065 ± 39	76	1148 ± 23
17	1050 ± 27	47	1061 ± 45	77	1153 ± 21
18	1052 ± 40	48	1055 ± 41	78	1158 ± 42
19	1053 ± 28	49	1078 ± 38	79	1149 ± 40
20	1057 ± 31	50	1085 ± 35	80	1167 ± 36
21	1057 ± 33	51	1077 ± 39	81	1151 ± 33
22	1058 ± 26	52	1083 ± 37	82	1163 ± 30
23	1061 ± 39	53	1090 ± 45	83	1170 ± 28
24	1055 ± 34	54	1094 ± 36	84	1174 ± 32
25	1051 ± 42	55	1086 ± 43	85	1175 ± 35
26	1057 ± 37	56	10953 ± 1	86	1168 ± 39
27	1053 ± 45	57	1089 ± 36	87	1165 ± 42
28	1042 ± 34	58	1085 ± 48	88	1174 ± 29
29	1032 ± 33	59	1091 ± 25	89	1162 ± 25
30	1043 ± 41	60	1093 ± 38	90	1171 ± 35

2-й період, 3 – 10 день від часу закладення біосистеми, час проростання насіння, коли до електро-генеруючих мікроорганізмів все ще не поступає достатня кількість субстрату від рослин для їх активного розвитку, оскільки рослини ще не сформовані (рис. 6.1.2). Біосистема і далі працює лише за рахунок джерел живлення мікроорганізмів самого ґрунтового субстрату. Сила струму та рівень напруги тримається на рівні 2-ої доби від початку роботи біоелектричної системи: середня сила струму в 2-й період складає 23.12 ± 0.75 мА (рис. 6.1.1), середня напруга в цей період становить $1045.25 \text{ мВ} \pm 30.77$ (табл. 6.1.1).

3-й період, 11–20 днів від моменту інсталяції біосистеми, це час появи перших паростків вівсяниці очеретяної *F. arundinacea* та їх активного росту, а відповідно, появи та зростання фотосинтетичної активності та росту корневих виділень органічних речовин, що є субстратом для розвитку електро-генеруючих мікроорганізмів (рис. 6.1.2). В 3-й період спостерігається ріст біоелектричних показників, який корелює з наростанням зеленої біомаси рослин. В цей період відбувається істотний підйом значень сили струму. На 20-й день, коли всі насінини проросли, середнє значення сили струму піднімається до відмітки 43.95 мА, що майже в 1.99 раз більше, ніж на 10-й день, на початку цього етапу, коли були зареєстровані лише перші поодинокі паростки ($P < 0.05$) (рис. 6.1.1). Середнє значення сили струму становить 30.60 ± 1.06 мА. В той же час, росту біоелектричного потенціалу не спостерігалось, він залишався на рівні попереднього 2-ого періоду і складав 1044.81 ± 34.20 мВ (рис. 6.1.2).

4-й період, від 20-ого до 90-ого дня від моменту інсталяції біотехнологічної системи, це час активного росту *F. arundinacea*. В цей час об'єм зеленої біомаси *F. arundinacea*, і відповідно, рівень фотосинтезу та екскреції органічних речовин, що досягають свого максимуму на 40-ту добу, стимулюють ріст ґрунтових електро-генеруючих мікроорганізмів (рис. 6.1.3). В цей час сягають свого максимуму і біоелектричні показники, ще раз підтверджуючи відмічену закономірність того, що електропродуктивність електро-біосистем залежить від розвитку рослин (Hubenova & Mitov, 2012; Lu et al., 2015). Біоелектрична система працює практично на повну потужність вже з 40-ого дня після її інсталяції (рис.

6.1.1, табл. 6.1.1). Середня сила струму поступово зростає: за період 20–40 днів середнє значення становить 40.88 ± 1.20 мА, за період 40–60 днів – 48.56 ± 1.52 мА, що перевищує її середньорічний середній показник, середня сила струму за період 60–90 днів ще вища і становить 49.61 ± 1.54 мА (рис. 6.1.1). Рівень напруги теж зростає (табл. 6.1.1) і перевищує середньорічний показник наприкінці 4-ого періоду, із 60–90 дня. Протягом 20–40-ого дня від початку інсталяції біосистеми середній біоелектричний потенціал складає 1050.55 ± 35.95 мВ, протягом 40–60 днів – 1064.38 ± 36.48 мВ, протягом 60–90 ого дня – 1140.56 ± 33.13 мВ.

Отже, біоелектрична система працює вже з перших хвилин після її інсталяції. Вже з другого дня біосистема працює майже на половину потужності. На початках, в перші 10 днів після інсталяції біосистеми в час адаптації і колонізації електродів електрико-генеруючими мікроорганізмами та проростання насіння біотехнологічна система працює за рахунок активності ґрунтових мікроорганізмів, джерелами живлення яких є сам ґрунтовий субстрат. Подальший ріст біоелектричних показників корелює з наростанням зеленої біомаси рослин. Істотний підйом значень біоелектрики, до 62% ($P < 0.05$), спостерігається протягом 11–20-ого дня, в процесі проростання насіння та активного росту перших паростків, коренева екскреція яких постачає субстрати для розвитку електро-генеруючих мікроорганізмів біоелектричної системи. З 40-ого дня після інсталяції біосистеми коли об'єм зеленої біомаси та рівень їх фотосинтетичної активності досягають свого максимуму біотехнологічна система працює на повну потужність.

Розвиток рослин безпосередньо впливає на електропродуктивність електро-біосистеми. Рівень біоелектрикопродуктивності системи корелював з розвитком рослин та рівнем їх фотосинтетичної активності, як показано теж в роботах з *Lemna minuta*, *Canna indica* та в нашій попередній роботі з *Alisma plantago-aquatica* (Hubenova & Mitov, 2012; Lu et al., 2015). Коефіцієнт Пірсона показує високу кореляцію розвитку рослин і генерації біоелектрики біосистемою і складає 0.85. Подібна динаміка зростання біоелектричних показників після інсталяції системи була зафіксовано зокрема, у нашій попередній роботі з аналогічною

електродною системою, але з болотистим субстратом та болотистою рослиною *A. plantago-aquatica*, а також, в експериментах з відмінною електродною системою та природним седиментним субстратом і рослиною *C. indica* (Lu et al., 2015). Проте у цих експериментах зростання було більш стрімким, біосистема швидше виходила на повну потужність, оскільки у субстрат висаджувалися не насіння, а паростки рослин, які з вже перших днів фотосинтезували та виділяли речовини, стимулюючи ріст електрико-генеруючих мікроорганізмів. Якщо у системі з ґрунтовим субстратом та висадженим насінням *F. arundinacea* біосистема працює практично на повну потужність з 40-ого дня, то з болотистим субстратом та паростками *A. plantago-aquatica* вже з 14-ого дня, а з *C. indica* близько із 30-ого дня (Lu et al., 2015).

6.2 Вплив сезонних умов на отримання біоелектрики.

Цілорічне функціонування біоелектричної системи з *F. arundinacea*

Вийшовши на максимальні показники протягом перших 3 місяців біотехнологічна система з *F. arundinacea* працює на такому ж рівні круглорічно з незначним сезонним падінням показників біоелектрики (рис. 6.2.1, 6.2.2) ($p > 0.444$, $p > 0.156$). Максимальні зафіксовані показники біоелектрики: сили струму – 57.36 мА, біоелектричного потенціалу – 1206 мВ (рис. 6.2.3).

Сезонне зниження генерації біоелектрики є невеликим і середньорічні показники біоелектрики є на відносно досить на високому рівні: середньорічні показники сили струму при 10 Ом становлять 44.56 мА, напруги відкритого кола – 1116.86 мВ.

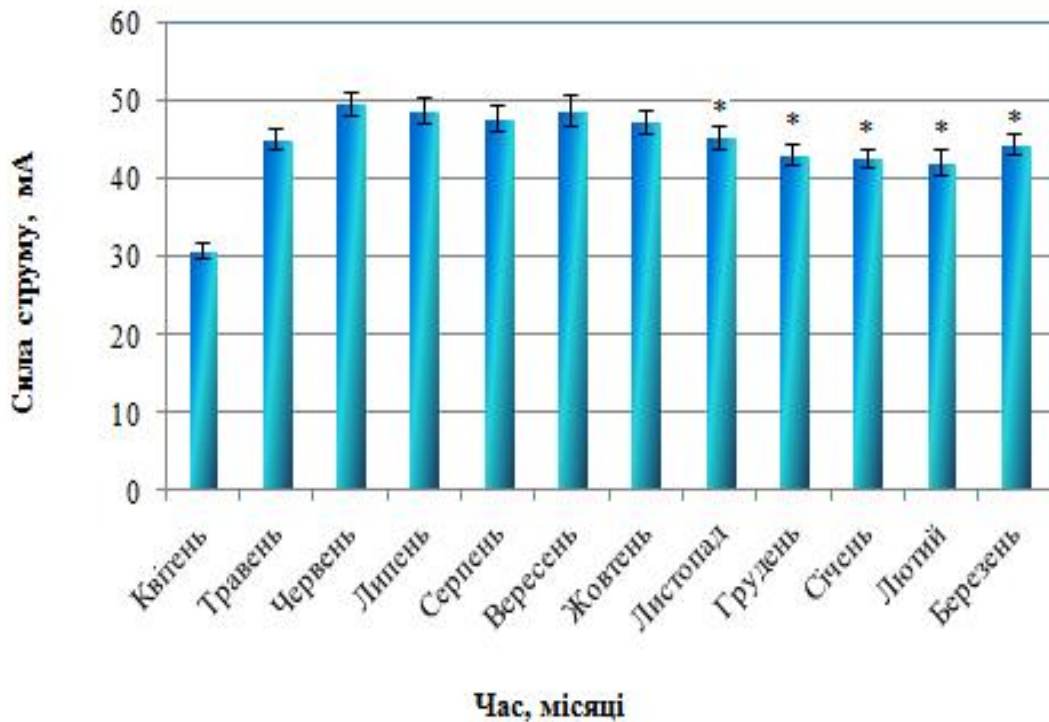


Рис. 6.2.1 Річна динаміка генерації сили струму біосистемою із *F. arundinacea* ($\bar{x} \pm SE, n=20$).

Найвищі значення спостерігаються протягом червня – жовтня

*Сезонне зниження сили струму протягом листопада-березня є статистично незначним ($p > 0.444$)

В літній період та перші місяці осені значення сили струму є вищими за середньорічні, перевищують 45 мА та є у діапазоні від 47.23 ± 1.61 мА (середнє значення за жовтень) до 49.61 ± 1.54 мА (середнє значення за червень) (рис. 6.2.1). В листопаді, сила струму знижується до 45.30 ± 1.57 мА, а в зимовий період ще опускається на рівень дещо нижче середньорічних показників і становить $42.01 \pm 1.62 - 43.05 \pm 1.33$ мА. З початком весни сила струму знову зростає (рис. 6.2.1). Аналогічна динаміка спостерігається із значеннями напруги, але сезонне зниження є в меншій мірі (рис. 6.2.2). Якщо сезонне зниження силу струму максимально становить 10.23 %, то сезонне зниження напруги відкритого кола лише 2.95 %, загалом 13.18% (рис. 6.2.1, 6.2.2).

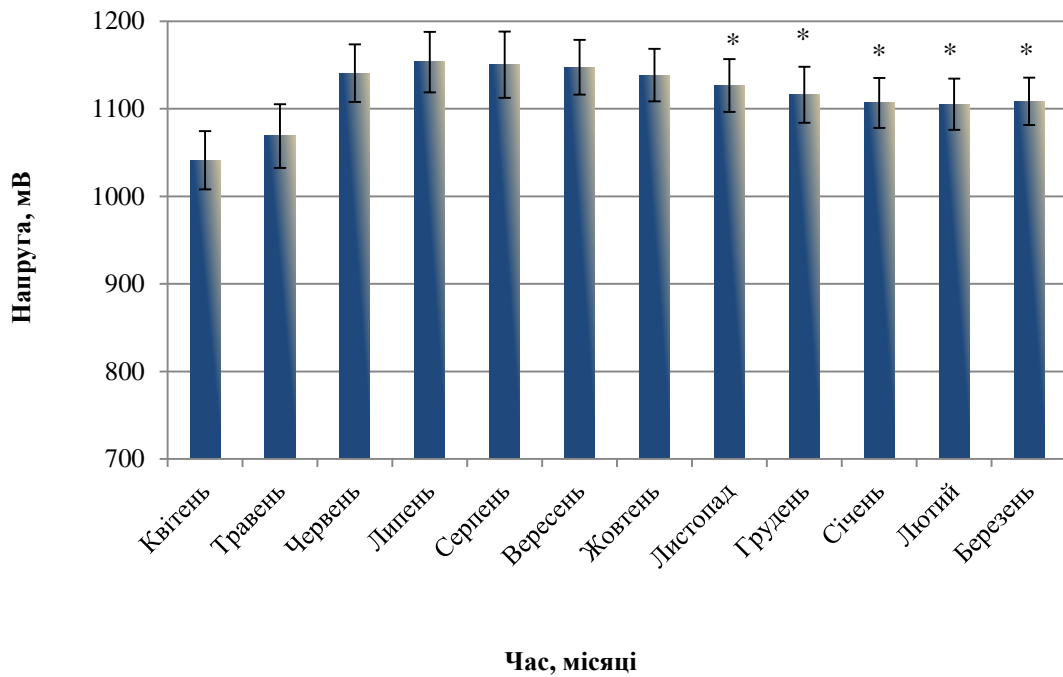


Рис 6.2.2 Річна динаміка рівня напруги відкритого кола біотехнологічної системи із *F. arundinacea* ($x \pm SE, n=20$).

Із 3-ого місяця після інсталяції біосистеми значення напруги утримуються на рівні вище 1100 мВ. *Сезонне зниження напруги протягом листопада-березня є статистично незначним ($p > 0.156$)

В зимовий період скорочення тривалості світлового дня, незважаючи на комфортні температурні умови, веде до зниження фотосинтетичної активності біоелектросистеми та відповідно, погіршення умов для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів і зниження генерації біоелектрики. Круглорічно спостерігаються щоденні невеликі коливання сили струму та напруги, що, ймовірно, пов'язані із кількістю отриманого світла та рівнем зволоженості ґрунту. Відмічено, що після сонячних днів біоелектричні показники дещо зростають, що пов'язано з більш активним фотосинтезом. Полив немає істотного значення, поки трав'яний покрив не сформований, проте коли трава максимально розвинута – зволоженість має позитивний ефект. В міру висихання ґрунту показники біоелектрики поступово спадають. Очевидно, що при високій вологості ґрунту

створюються оптимальні умови для життєдіяльності електрико-генеруючих мікроорганізмів.

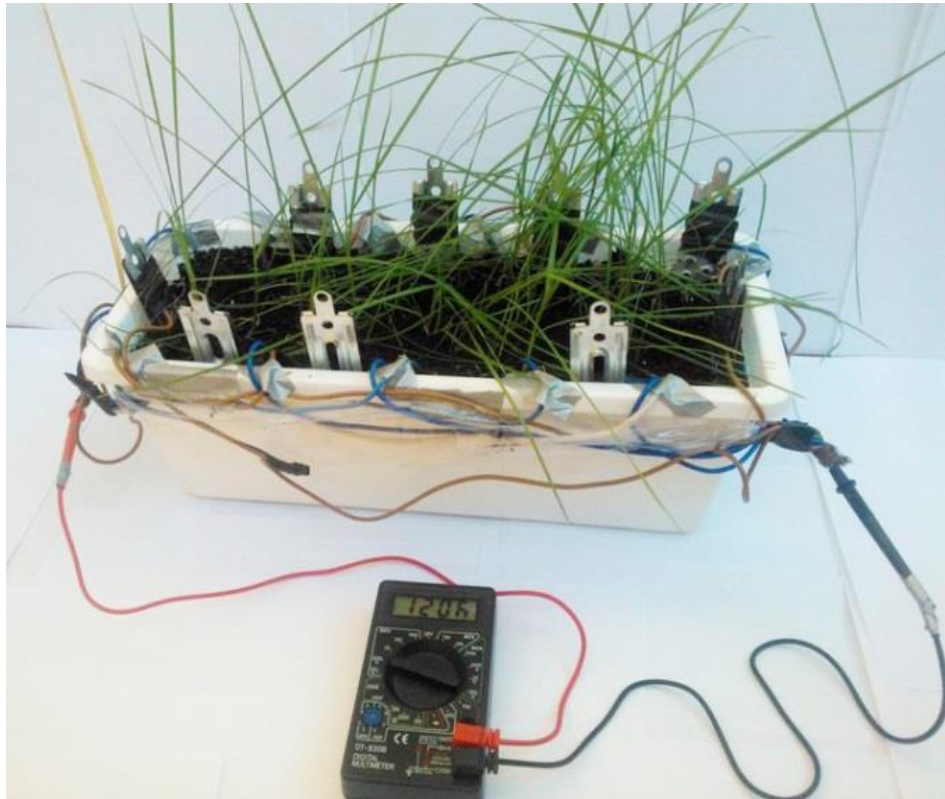


Рис 6.2.3 Максимальні зафіксовані показники напруги відкритого кола біотехнологічної системи із *F. arundinacea*

Ми проаналізували роботу рослинно-мікробної біосистеми з *F. arundinacea* також в умовах навантаження в осінній період. Отримані нами максимальні значення густини сили струму становлять 1.05 A/m^2 , нормалізовані до 1 m^2 поверхні, охопленої рослинами та електродами, при зовнішньому опорі $200 \text{ }\Omega$ (рис. 6.2.4). В інших біоелектричних системах з відмінними електродними системами зафіксовано 1.60 A/m^2 в синтетичному середовищі (Helder et al., 2012) та у водному середовищі 1.62 A/m^2 (Hubenova & Mitov, 2012). Густина потужності невисока при опорі вище $1 \text{ k}\Omega$, подібно, як в роботах Cheng et al. (2006), а найвища густина потужності, $0.49 - 0.88 \text{ W/m}^2$ зафіксована при навантаженні $10 - 200 \text{ }\Omega$ (рис. 6.2.4).

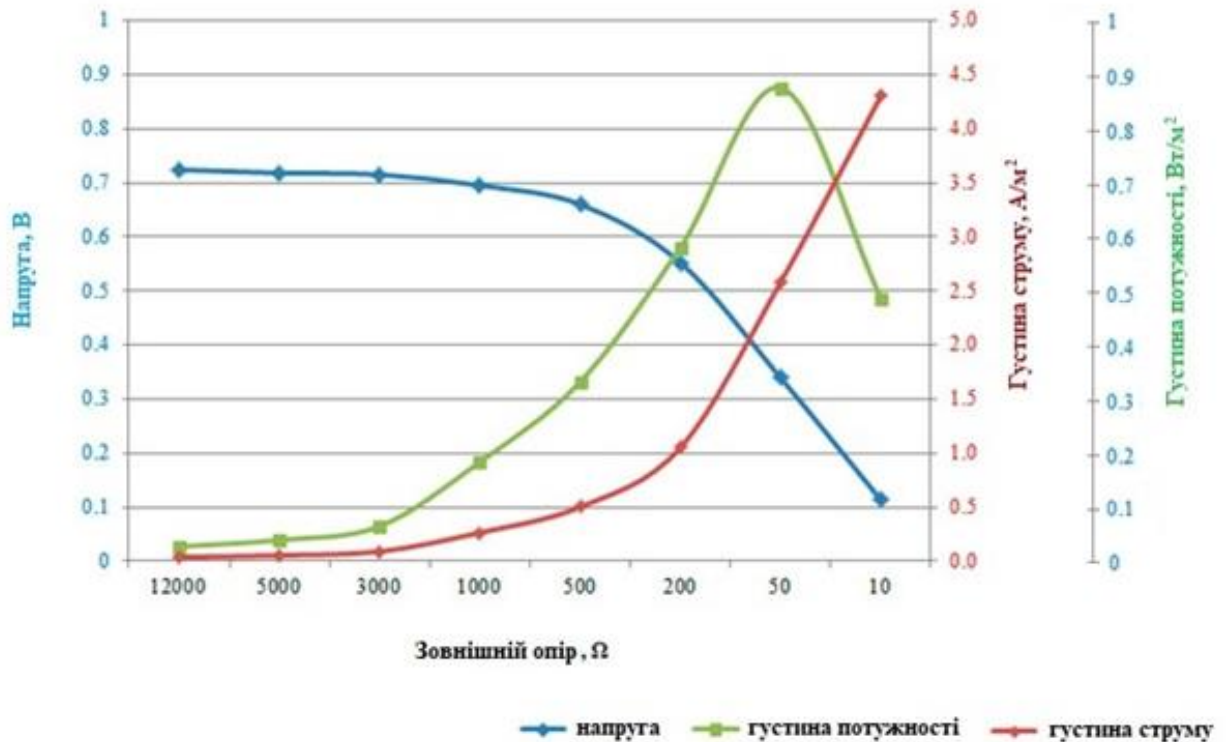


Рис. 6.2.4 Зміна напруги, густини сили струму та густини потужності біосистеми з *F. arundinacea*, нормалізовані до 1 м² поверхні, охопленої рослинами та електродами (PGA), при застосуванні зовнішнього опору в діапазоні від 12 к Ω до 10 Ω

Отже, біотехнологічна система з *F. arundinacea* ефективна протягом року в умовах приміщень. Потужність біосистеми найвища в час найбільшої фотосинтетичної активності рослин у літній період та осінній період. Сезонне зниження біоелектрики, пов'язане із зниженням світлового дня незначне. Зволоженість ґрунту та отримання великої кількості світла позитивно впливають на продукування біоелектрики біосистемою.

6.3 Особливості *F. arundinacea* як біокомпонента електробіотехнології

Основними вимогами до рослини, які можна застосовувати для біоелектротехнологій у квартирах є їх життєздатність в умовах будинку, легкий

догляд за ними та їх висока електропродуктивність при їх декоративності. Ще одною важливою характеристикою рослин для біосистем є їх бюджетність. Очевидно також, що річна електропродуктивність вища у рослин, що формують круглорічний фотосинтезуючий зелений покрив та в багаторічних рослин, які володіють потужним ризодепозитом та інтенсивною секрецією органічних речовин (Lynch & Whipps, 1990; Kuzyakov & Domanski, 2000; Dennis et al., 2010).

Простоту догляду за рослинами та біосистемою забезпечують такі характеристики рослин, як:

- багаторічність, що означає відсутність необхідності щороку висіювати насіння;
- стійкість як до засухи, так і до перезволоження, тобто відсутність залежності рослини від режиму поливу чи навіть його відсутності певний час;
- термостійкість, що досить актуально в літній період для рослин, які перебувають під прямим сонячним світлом безпосередньо перед вікнами;
- тіневиносливість, що розширює можливості розміщення електрогенераторних контейнерів по приміщенню;
- стійкість до захворювань, а отже, відсутність коштів та зусиль на терапевтичні заходи.

Тому, при виборі виду рослини для електробіотехнології з ґрунтовим субстратом, свою увагу ми скерували на газонні трави, що володіють всім вищенаведеним комплексом необхідних даних та одночасно є бюджетними, завдяки їх широкій поширеності та здатності активно і швидко розмножуватись насінням. Багато видів газонних трав вимогливі до ґрунтової вологи та погано переносять посушливі умов, як наприклад, такі поширені газонні трави, як райграс пасовищний *Lolium perenne* L., мітлиця біла *Agrostis alba* L. (Wilman et al., 1998) тощо. Трави роду костриці, *Festuca*, є одними з найменш вимогливих щодо умов зростання, ростуть на всіх типах ґрунтів, високо посухостійкі та добре переносять спеку. Костриця очеретяна *F. arundinacea* L. є стресостійким видом

(Ashraf & Harris, 2005), однією з найбільш посухо резистентних і терmostійких трав (Bacon, 1993, Elmi & West, 1995), росте на засолених ґрунтах та різноманітних субстратах (Sykora, 1983), її стійкість до захворювань в цілому висока (Swist, 2015). Костриця очеретяна *F. arundinacea* – багаторічний широко поширений вид, що зростає на луках та в лісах від північних широт Англії до південних широт Африки та Азії, в широкому кліматичному діапазоні (Gibson & Newman, 2001, Clayton et al., 2006, Dzyubenko & Dzyubenko, 2008), що обумовлено її унікальними властивостями, її рекомендують як траву для газонів (Hill et al., 1995; Swist, 2015). Зважаючи на вищевказані літературні дані, костриця очеретяна *F. arundinacea* була обрана нами як біокомпонент електробіотехнології, і, як показали наші дослідження, рослина формує круглорічний зелений покрив в умовах приміщень, є невибаглива у догляді та забезпечує генерацію біоелектрики разом з природним біомом мікроорганізмів біосистеми.

6.4 Перспективи біосистем з *F. arundinacea* в будинках та їх бюджетність.

Нові підходи до створення рослинно-мікробних біосистем

Розробка біосистем чи біогенераторних станцій власне для приміщень у вигляді контейнерів з електродними системами та рослинами є досить новим рішенням, оскільки більшість існуючих електробіотехнологій розробляються для застосування на зелених дахах (Helder et al., 2013) або *in situ*: заболочених місцевостях (Timmers et al., 2010), рисових полях (Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010). Перевагою електро-біосистем відкритих місцезростань є їх можливість охопити значно більшу площу. Проте продуктивність біоелектродних систем у відкритих місцезростаннях рослин залежить від кліматичної зони і в країнах північ широт стикається з труднощами під час тривалого холодного періоду. Випробування зелених дахів в умовах голандської зими показало суттєве зниження потужності в осінньо-зимово-весняний період (Helder et al., 2013). В той же час як падіння продуктивності електро-біосистеми з *F. arundinacea* у

аналогічний період складає лише на 6.57 %. Біотехнологія, що експлуатується в приміщенні не залежить від погодних умов та дозволяє отримувати біоелектрику круглорічно.

Застосування для електро-біотехнології неболотистої рослини, газонної трави, та універсального ґрунтового субстрату є ще одним новим підходом. *F. arundinacea* не використовувалася досі в якості біокомпоненту у відомих розроблених електро-біосистемах у світі. Більшість науковців в своїх електро-біотехнологічних розробках використовують типові рослини вологих та болотистих місцезростань: рис посівний *Oryza sativa* (De Schamphelaire et al., 2008; Kaku et al., 2008), спартина англійська *Spartina anglica* (Timmers et al., 2010; Helder et al., 2010; Wetser et al., 2015b), тростянка аномальна *Arundinella anomala* та арундо тростниковий *Arundo donax* (Helder et al., 2010), тростник південний *Phragmites australis* (Wetser et al., 2015b), лепешняк великий *Glyceria maxima* (Timmers et al., 2012), ряска дрібна *Lemna minuta* (Hubenova & Mitov, 2012), іпомея водна *Ipomea aquatica* (Liu et al., 2013), рогіз широколистяний *Typha latifolia* (Oon et al., 2015), канна індійська *Canna indica* (Yadav et al., 2012, Lu et al., 2015). Це зумовлено тим, що в болотистих субстратах, які є оптимальними для розвитку даних рослин вологих місцезростань, створюються оптимальні умови для збору біоелектрики (Lovley et al., 2011; Helder et al., 2012).

Багато досліджень присвячені біоелектро-системам, де в якості субстрату для розвитку рослин та мікроорганізмів використовують синтетичні сполуки, буферні розчини, які подаються в процесі їх функціонування (De Schamphelaire et al., 2008; Helder et al., 2010, 2011; Yadav et al., 2012; Liu et al., 2013). Це піднімає кошторис електро-біосистеми та ускладнює її обслуговування. Здорожчує біоелектро-системи і використання в якості рослин саджанців специфічних рослин (Helder et al., 2010; Lu et al., 2015; Yadav et al., 2012; Liu et al., 2013). Ми розробили бюджетну біоелектрикопродукуючу систему із універсальним ґрунтовим субстратом, насінням широко-поширеної газонної трави та дешевою електродною системою (Rusyn & Medvediev, 2018). У створенні біосистеми генерації біоелектрики для приміщень ми поставили за мету:

- підібрати дешеві та максимально прості в інсталяції і обслуговуванні біологічні і технічні компоненти системи;
- можливість самостійної інсталяції кожною людиною без спеціальних навиків;
- простий догляд за біосистемою, що не потребує будь-яких інших дій, крім як поливу в міру підсихання субстрату;
- створити електро-біосистему, що функціонує самодостатньо круглорічно, виконуючи декоративну функцію та слугуючи джерелом електрики.

Бюджетною альтернативою синтетичним речовинам та буферним розчинам є природні болотисті седиментні субстрати, представлені зокрема в роботах Lu et al. (2015) та в розробках, представлених в нашому попередньому розділі. Проте, універсальні ґрунтові субстрати, є не лише більш бюджетними, але і дають можливість значно розширити асортимент рослин для біоелектротехнологій всередині будівель.

Бюджет біоелектросистеми із *F. arundinacea* представлений в табл. 6.4.1. Якщо брати до порівняння ціни на матеріали в європейських країнах, вартість універсального ґрунтового субстрату, використаного в даній роботі для однієї біосистеми є в 2.19 раз нижчою, ніж вартість субстрату на основі суміші торфів. Застосування насіння, а не саджанців рослин, і зокрема, в цій роботі, насіння широко поширеної газонної трави *F. arundinacea* веде до ще більш значного здешевлення електро-біотехнологічної системи. Для 1м² біоелектрико-продукуючої системи необхідно лише 20 г насіння, вартістю 0.61 EUR, в той час як для 1 м² біоелектро-продукуючої системи необхідно 40 паростків молодих рослин, вартість їх значно вища, зокрема, у випадку *A. plantago-aquatica* вища в 154 рази і складає 94 EUR. В результаті, електро-біосистема із *F. arundinacea* є дешевшою від біоелектрико-продукуючої системи з *A. plantago-aquatica*, експлуатуючої саджанці рослин. Вартість 1 г насіння широко поширених рослин *F. arundinacea*, необхідного для одного електро-біосистемного контейнера є в 83.3 раз нижчим від вартості двох паростків *A. plantago-aquatica*, необхідних для однієї електро-біосистеми. Вартість однієї біоелектрико-продукуючої системи з *F.*

arundinacea становить 25.99 EUR супроти 31.70 EUR за одну біоелектросистему з *A. plantago-aquatica*, а вартість її 1 м² становить 481.41 EUR супроти 634 EUR системи з *A. plantago-aquatica* чи 632.31 EUR вартості 1 м² зелених біоелектричних дахів (Green Electricity Roof) (Timmers et al., 2012) (табл.6.4.1).

Таблиця 6.4.1 Вартість компонентів біоелектрико-продукуючої біосистеми з *F. arundinacea*

Складові елементи біосистеми	Вартість однієї біосистеми, EUR *	Вартість однієї біосистеми, EUR**	Вартість 1м ² , EUR
Контейнер	1.40	3.27	28.00
Катодна система з дротами	1.03	16.49	328.80
Анодна система з дротами	1.33	5.33	106.60
Насіння рослини	0.03	0.03	0.61
Ґрунтовий субстрат	0.67	0.87	17.40
Всього	4.46	25.99	481.41

Примітки: * середня вартість в Україні та ** країнах Європи станом на 2021 р

Як показали наші експерименти, використовуючи в біоелектротехнологічній системі універсальний ґрунтовий субстрат, неболотисту рослину *F. arundinacea* та графітово-оцинковано-сталеві електроди можна отримати досить високі значення сили струму та напруги на рівні і навіть вище, ніж з дорожчими варіантами з болотистими субстратами, електродами та саджанцями рослин вологих місцезростань.

Дві розроблені електро-біосистеми для енергоефективних будинків, на основі водного подрожника та костриці очеретяної, є ефективні цілорічно і характеризуються високою потужністю (табл. 6.4.2). Сезонний рівень редуції рівня біоелектрики обох є незначним 8.71–13.18%. Проте, електро-біосистема, базована на *F. arundinacea* характеризується як вищою потужністю, так і більшою бюджетністю. Біосистема з *F. arundinacea* є в 1.5 раз більш економічно вигідною, в основному, завдяки використанню насіння та характеризується на 20.95 % вищою потужністю.

Таблиця 6.4.2 Порівняльна характеристика базових характеристик біосистем з *A. plantago-aquatica* та *F. arundinacea*

Характеристики \ Біосистема	<i>A. plantago-aquatica</i>	<i>F. arundinacea</i>
Сезонна втрата електрики, %	8.71	13.18
Потужність, мВт/м ² PGA	702	888
Вартість рослинного компоненту, EUR	2.50	0.03
Вартість субстрату, EUR	0.45	0.67
Сумарна вартість біомодуля 0.0525м ² , EUR	6.71	4.46

Подяка

Висловлюю свою щирю вдячність провідному конструктору Медведєву Олександрю Валентиновичу за консультації щодо реалізації технологічного етапу роботи та магістру екологу Богдану Валько за допомогу в реєстрації біоелектричних показників.

Висновки до розділу 6

Розроблена біоелектрикопродукуюча біосистема у вигляді контейнера з рослинами *F. arundinacea* та електродною системою, яка одночасно використовується для озеленення помешкання. Було показано, що використовувана графіт/оцинковано-стальна електродна система може ефективно працювати з універсальним ґрунтовим субстратом в умовах приміщень. Це має важливе значення, оскільки в перспективі дозволяє, у таких мінібіоелектростанціях приміщень використовувати широкий асортимент декоративних рослин, для розвитку яких оптимальним є ґрунтовий субстрат, що істотно впливає на вартість та обслуговування.

Газонна трава *F. arundinacea* є оптимальною рослиною для квартирної електробіотехнологічної системи, оскільки є декоративною, багаторічною, стійкою до посухи, перезволоження, затінення та забезпечує генерацію високих значень сили струму 44.62 ± 1.48 мА та напруги 1116.86 ± 31.94 .

Використання насіння *F. arundinacea*, універсального ґрунтового субстрату та графіт/оцинковано-стальної електродної системи в даній технології значно здешевлює вартість біоелектросистеми.

Трав'яний зелений покрив в умовах квартири, дозволяє отримувати біоелектрику незалежно від сезонних умов, що особливо актуально для країн північних широт. Електробіотехнологічна система з *F. arundinacea* ефективна круглорічно, а сезонне зниження рівня біоелектрики складає 13.18 %.

Розвиток рослин безпосередньо впливає на електро-продуктивність біосистеми. Генерація біоелектрики біосистемою найвища в час найвищої фотосинтетичної активності Коефіцієнт Пірсона показує високу кореляцію розвитку рослин і генерації біоелектрики біосистемою і складає 0.85.

Біоелектрична система працює вже з перших хвилин після її інсталяції за рахунок донорів електронів, що містяться у ґрунті та практично на повну потужність з 40-ого дня після інсталяції біосистеми, коли об'єм зеленої біомаси та рівень їх фотосинтетичної активності досягають свого максимуму. Середній

струм починаючи з 20-ого дня експерименту, розвитком перших паростків, є статистично значимо вищим в порівнянні з середнім струмом фази проростання насіння ($P < 0.05$).

Біосистема для внутрішніх приміщень доступна кожному в інсталяції та обслуговуванні, для цього не потрібно спеціальних навичок. Біосистема з *F. arundinacea* характеризувалася на 20.95 % вищою потужністю та була в 1.5 раз більш економічно вигідною при застосуванні в енергоефективних будинках всередині, ніж електро-біосистема з *A. plantago-aquatica*. Біоелектрична система з *F. arundinacea* має хороші базові характеристики для подальшого вдосконалення та максимізації збору біоелектрики в будинках.

Матеріали розділу опубліковані в публікаціях:

Rusyn, I. B., & Valko, B. T. (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20 (3), 211-229. doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674. **Scopus (Q3)** та міжнародний журнал, USA

Література до розділу 6

- Arends, J. B. A. & Verstraete W. (2012). 100 years of microbial electricity production: three concepts for the future. *Microbial Biotechnology*, 5(3), 333–346. doi: 10.1111/j.1751-7915.2011.00302.x
- Apollon, W, Luna-Maldonado, I. A, Kamaraj, S.-K., Vidales-Contreras A. J., Rodríguez-Fuentes H., Gómez-Leyva F. J., Maldonado-Ruelas A. V., & Ortiz-Medina A. R. (2023). Self-sustainable nutrient recovery associated to power generation from livestock's urine using plant-based bio-batteries. *Fuel*, 332, e126252. doi: 10.1016/j.fuel.2022.126252
- Arulmani, S. R. B. Gnanamuthu, H. L. Kandasamy S., Govindarajan, G. Alsehli, M. Elfasakhany, A. Pugazhendhi, & A. Zhang, H. (2021). Sustainable bioelectricity production from *Amaranthus viridis* and *Triticum aestivum* mediated plant microbial fuel cells with efficient electrogenic bacteria selections. *Process Biochemistry*, 107, 27-37. doi: 10.1016/j.procbio.2021.04.015
- Ashraf, M. & Harris, P. J. C. (2005). Abiotic Stresses: Plant Resistance Through Breeding and Molecular Approaches. The Haworth Press, Binghamton, NH, USA. doi.org/10.1017/S0014479706283790
- Bacon, C. W. (1993). Abiotic stress tolerances (moisture, nutrients) and photosynthesis in endophyte-infected tall fescue. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 44, 123–141.
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, 40, 2426–2432. doi: 10.1021/es051652w
- Clayton, W. D., Vorontsova, M. S., Harman, K. T. & Williamson, H. (2006). GrassBase – The Online World Grass Flora, from <http://www.kew.org/data/grasses-db.html>.
- De Schampelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from

- rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- Dennis, P. G., Miller, A. J., & Hirsch, P. R. (2010). Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? *FEMS Microbiology Ecology*, 72(3), 313–327. doi: 10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x
- Dzyubenko, N. I. & Dzyubenko, E. A. (2008). Osnovnyie selskohozyaystvennyie kultury. *Festuca arundinacea* L. – Ovsyanitsa trostnikovidnaya [The main agricultural crops. Cane fescue *Festuca arundinacea* L.]. In: Afonin, A. N., Grin, S. L., Dzyubenko, N. I., Frolov, A. N., Eds., Agroekologicheskiy atlas Rossii i sopredelnyih stran: ekonomicheski znachimyye rasteniya, ih vrediteli, bolezni i sornyye rasteniya [Agroecological atlas of Russia and neighboring countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds] from <http://www.agroatlas.ru> (In Russian).
- Elmi, A. A. & West, C. P. (1995). Endophyte infection effects on stomatal conductance, osmotic adjustment and drought recovery of tall fescue. *New Phytologist*, 131, 61–67.
- Gibson, D. J. & Newman, J. A. (2001). *Festuca arundinacea* Schreber (*F. elatior* L. ssp. *arundinacea* (Schreber) Hackel). *Journal of Ecology*, 89, 304–324. doi: 10.1046/j.1365-2745.2001.00561.x
- Gomora-Hernandez, J. C., Serment-Guerrero, J. H., Carreno-de-Leon, M. C., & Flores-Alamo, N. (2020). Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19 (1), 227–237. doi: 10.24275/rmiq/IA542
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124

- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2011). New plantgrowth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, *104*, 417–423. doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.005
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, *5*, 70. doi: 10.1186/1754-6834-5-70
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T, Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, *51*, 1–7. doi:10.1016/j.biombioe.2012.10.011
- Hill, D. A., Andrews, J., Sotherton, N. & Hawkins, J. (1995). Farmland. In: Sutherland, W. J. & Hill, D. A., (Eds.). *Managing Habitats for Conservation*. 230–266. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2012). Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*, *87*, 185–191. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *79*(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Kuijken, R. C. P., Snel, J., Bouwmeester, H., & Marcelis, L. F. M. (2011). Quantification of exudation for the plant-microbial fuel cell. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, *76*(2), 15–18.
- Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000) Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *163*(4), 421–431.
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, *172010*, 1–10. doi:10.1155/2013/172010
- Lovley, D. R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N. S., Shrestha, P. M., Flanagan, K. A., Aklujkar, M., Butler, J. E., Giloteaux, L., Rotaru, A. E., Holmes, D. E., Franks, A.

- E., Orellana, R., Risso, C., & Nevin, K. P. (2011). Geobacter: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *Advances in Microbial Physiology*, 59, 1–100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 195, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Lynch, J. M., & Whipps, J. M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 129(1), 1–10.
- Mead, M. N. (2008). Benefits of Sunlight: A Bright Spot for Human Health. *Environmental Health Perspectives*, 116 (4), A160–A167. doi: 10.1289/ehp.116-a160
- Moqsud, M. A., Yoshitake, J., Bushra, Q. S., Hyodo, M., Omine, K., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, 36, 63–69. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.004
- Moqsud, M. A., Gazali, T. A., Omine, K., & Nakata, Y. (2017). Green electricity by water plants in organic soil and marine sediment through microbial fuel cell. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(2), 160–165. doi:10.1080/15567036.2016.1159263
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, 186, 270–275. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.014
- Robson, M. J. & Jewiss, O. R., (1968). A comparison of British and North African varieties of tall fescue (*Festuca arundinacea*). II. Growth during winter and survival at low temperatures. *Journal of Applied Ecology*, 5, 179–190.
- Regmi, R., Katechaimongkol, J., Deepang, C., Sawangareetagul, S., & Nitorisavut, R. (2016). Investigation of *Vetiver* grass for bioelectricity production and wastewater treatment in low cost earthen membraned microbial fuel cell. In Proceeding of 6th International Conference SEE 2016 in conjunction with 6th International

- Conference ICGSI 2016 and 1st International Conference CTI 2016, 1–2, Bangkok, Thailand.
- Rothballer, M., Engel, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Schloter, M., & Hartmann, A. (2011). Comparison of bacterial rhizosphere communities from plant microbial fuel cells with different current production by 454 amplicon sequencing. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 76(2), 31–32.
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2015). Sposib priamoho otrymannia bioelektryky z gruntu [The method of obtaining bioelectricity from the ground]. Patent of Ukraine 98393, filed November 17, 2014, issued April 27, 2015 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B. (2016). Osnovy biolohii [Fundamentals of Biology]. FOP Afonin A.O. DoubleApublishing, Kyiv(in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2016). Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybyunnykh shariv gruntu [Biological method of producing bioelectricity from deep soil layers]. Patent of Ukraine 112093, filed March 9, 2016, issued December 12, 2016 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymannia bioelektryky iz konteinera z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodov [The method for bioelectricity obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).
- Sarma, P. J. & Mohanty, K. (2018). *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. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126 (3), 404–410. doi: 10.1016/j.jbiosc.2018.03.00
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. doi:10.1002/er.1397
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and

- electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001
- Swist, I. (2015). Selection of lawn grass: a choice of the best genus, from <http://sad.ukrbio.com/ua/articles/7803>.
- Sykora, K. V. (1983). A synecological study of the *Lolio-Potentillion anserinae* Tüxen 1947 by means of permanent transects. I. Brackish stenohaline habitats. *Proceeding of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Series C, Biological and Medical Sciences*, 86, 525–566.
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, 74, 1271–1273.
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 86(3), 973–981. doi: 10.1007/s00253-010-2440-7
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 94(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015a). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137, 151–157. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.006
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C.J.N., & Strik, D.P.B.T.B. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, 83, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015b). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation

of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, 83, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006

Wilman, D., Gao, Y. & Leitch, M. H. (1998). Some differences between eight grasses within the *Lolium–Festuca* complex when grown in conditions of severe water shortage. *Grass & Forage Science*, 53, 57–65.

Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, 47, 126–131. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.06.029

Розділ 7. Перспективи біосистем з *C. palustris* на балконах і терасах енергоефективних будинків та *in situ*

Балкони і тераси сучасних енергоефективних будинків можуть бути ще одним важливим місцем для застосування біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики. Мікробно-рослинні електро-біосистеми є перспективною відновлювальною біотехнологією, кінцевим продуктом яких є отримання електроенергії. Відновлювальна енергетика в теперішній час займає все більшу частку у виробленні електроенергії. Ризосферні мікроби конвертують органічні продукти рослинного фотосинтезу та переносять електрони через електронний ланцюг на електроди. Електрико-генеруючі мікроорганізми продукують біоелектрику, утилізуючи органічні речовини, що виділяються в субстрат через кореневу систему активно-фотосинтезуючих рослин (De Schamphelaire et al. 2008; Kaku et al. 2008; Strik et al., 2008) чи в процесі розпаду органічного опаду листя та коріння рослин (Dai et al., 2015) і сполук субстрату. Біотехнологія отримання енергії з субстрату, в якому розвиваються рослини та мікроорганізми, є абсолютно натуральна і безпечна для середовища: в ній відсутні викиди токсичних та парникових газів, що є продуктом спалювання традиційних невідновлювальних джерел енергії. При цьому мікробно-рослинна електробіотехнологія потенційно є більш електропродуктивною, ніж спалювання біомаси або анаеробне розщеплення рослин аналогічної площі (Wetser, 2016). Дана біотехнологія не потребує будівництва масштабних станцій, як то ТЕС, ГЕС, АЕС чи встановлення вітряків, що потребують великих капіталовкладень та площ. Мікробно-рослинна біотехнологія використовує вже існуючі зелені насадження та не потребує виділення для себе спеціальних площ, як наприклад, для сонячних електростанцій. При цій біотехнології єдиним і малозатратним, в порівнянні з іншими видами енергетики, та зовсім неагресивним втручанням в навколишнє середовище є інсталяція в ґрунт електродних систем, які збирають генеровану ґрунтовими мікроорганізмами електроенергію.

На даний момент мікробно-рослинно електробіотехнологія стикається з проблемою низькою потужності (Helder et al., 2013; Wetser et al., 2017; Nitorisavut, 2017). Способами максимізації збору мікробно-рослинної біоелектрики є вибір нових рослин як біокомпонентів біосистем (Helder et al., 2010; Hubenova & Mitov, 2012; Regmi et al., 2016), застосування нових електродних систем (Picot et al., 2011; Chen et al., 2012) та нових поживних субстратів, як синтетичних (Helder et al., 2011; Yadav et al., 2012; Liu et al., 2013) так і природних субстратів (Moqsud et al., 2015; Wetser et al., 2017).

Метою цієї роботи було розробити нову рослинно-мікробну біосистему для генерації біоелектрики на відкритих балконах та терасах енергоефективних будинків, використовуючи два нові біологічні агенти: рослини та анеліди. Скринінг нових рослин в оптимізації електробіотехнологій має важливе значення, оскільки види рослин суттєво відрізняються кореневими виділеннями, від яких залежить розвиток електро-генеруючих та супутніх мікроорганізмів та, відповідно, рівень біоелектрики (Hutsch et al., 2012). Використання анелід в біосистемах генерації біоелектрики є цікавим питанням, що досі не було вивчене. Анеліди можуть відігравати суттєву роль в електрогенезі, оскільки відома їх роль у оптимізації структури ґрунту, його водно-повітряного обміну та створенню центрів мікробної активності.

Селекцію рослин для екоелектробіотехнології ми проводили серед болотистих рослин з огляду на те, що заболочені умови є оптимальними для збору ґрунтової біоелектрики (Lovley et al., 2011; Helder et al., 2012), а види рослин вологих місцезростань є популярним та оптимальним об'єктом досліджень рослинно-мікробної біоелектрики науковцями всього світу (Timmers et al., 2012; Lu et al., 2015). В цій роботі ми проаналізували перспективи генерації біоелектрики рослинно-мікробною біосистемою з такими новими біокомпонентами, як: 1) рослинами *S. palustris* та 2) анелідами *L. terrestris* в універсальному ґрунті Один з найважливіших аргументів в користь вибору для електробіотехнології *S. palustris* є те, що калюжниця болотяна є зимовим першоквітом (Akhani, 2014), що розкриває можливість отримувати біоелектрику

вже з ранньої весни, коли земляний покрив позбавлений рослинності. *S. palustris* є зимостійкою рослиною, що витримує морози до -35°C , що актуально для застосування біотехнології в країнах помірною поясу, де рослина широко поширена.

Багаторічність калюжниці болотяної означає, що рослина, активно секретує органічні речовини через корені (Lynch & Whipps, 1990; Kuzyakov & Domanski, 2000) та нагромаджує у ґрунті потужний ризодепозит (Jones et al., 2004; Dennis et al., 2010; Nutsch et al., 2012), який є субстратом для розвитку ґрунтових електрогенеруючих мікроорганізмів (Rothballer et al., 2011). Водночас рослина є декоративною (Moroziuk & Protopova, 2007), що дозволяє біоелектротехнологіям з *S. palustris* виконувати естетичну функцію. Калюжниці болотяна є широкопоширена по всій території України та помірному поясі Північної та Південної півкулі (Schuettpelz & Hoot, 2004; Akhani, 2014), не вимагає складного догляду, що додає як бюджетності біотехнології, так і розкриває можливості використання обширних невикористовуваних площ її зростання як джерела біоелектрики. Тобто, рослинна володіє цілим комплексом цінних характеристик для застосуванні у електробіотехнологіях і стала б чудовим їх біокомпонентом за умови високої біоелектропродуктивності рослини.

Вивчення біоелектропродуктивності *S. palustris* ми проводили в реальних кліматичних умовах використання біотехнології на заболочених територіях українського Полісся та Карпат *in situ*. Дослідження біоелектрики, в основному, проводяться на сконструйованих болотних системах в лабораторних умовах (Lu et al., 2015; Oon et al., 2015; Wetser et al., 2015). Дослідження щодо застосування електробіотехнологій практично, *in situ*, лише розвиваються: на рисових полях (Kaku et al., 2008; Takanezawa et al., 2010), солончаках (Timmers et al., 2010), лісових заболоченнях (Dai et al., 2015).

Можливість використання площ балконів та терас будинків для отримання біоелектрики шляхом їх озеленення *S. palustris* є ще одною новою ідеєю. Зелені дахи є будинок-асоційованим місцем застосування електробіотехнологій (Helder et al., 2013). Проте, балкони та тераси будинків займають також великий сегмент в

житловому фонді. Це приквартирні відпочинкові зони багатоповерхівок та особняків, які могли би отримати ще одне важливе, енергетичне призначення, служити для вирішення невеликих локальних енергопотреб мешканців квартир: підсвітки балкону, тераси чи підзарядки мобільних телефонів, якщо б на них вдалося застосувати ефективну біоелектропродуктивну біосистему. І хоч часто площа терас і балконів їх невелика, проте встановлення вертикальних конструкцій розташованих один над одним електро-ящиків з рослинами, вирішує як проблему збільшення площі продукування біоелектрики, так і створення декоративної зеленої зони.

Багато робіт по вивченню використання рослинно-мікробної енергії проводяться в рідких синтетичних середовищах чи болотистих седиментах (Helder et al., 2011; Yadav et al., 2012; Wetser et al., 2015). Але рослинно-мікробну біоелектрику можна отримувати і в субстратах з низькою провідністю (Wetser et al., 2017). В цій роботі ми поставили перед собою завдання вивчити можливість використання біоелектротехнологій з болотяною рослиною в універсальному ґрунтовому субстраті. Успішний експеримент означав би можливість спрощення і здешевлення біотехнології та можливість додаткового місця, балконів і терас, для отримання біоелектрики.

Природним біопідсилювачем продукції біоелектрики могли би стати земляні черв'яки, аннеліди, так як, *L. terrestris*, які мають важливе значення як для розвитку рослин, так і для функціонування ґрунтових мікроорганізмів (Khomyakov, 2009; Arancon and Edwards, 2011; Blouina et al., 2013). Земляні черви є активними регуляторами ґрунтової мікробіоти, сприяючи розвитку певних популяцій ґрунтових мікроорганізмів (Khomyakov, 2009), і цілком можливо, електрико-генеруючих. Виходячи з цих даних, ми поставили завдання дослідити ефект *L. terrestris* на вихід рослинно-мікробної енергії.

Отже, завданнями роботи було вивчити перспективи генерації біоелектрики біосистемою на базі

- *S. palustris*, морозостійкої і болотистої, декоративної і широко поширеної багаторічної рослини

- в універсальному ґрунтовому субстраті як середовищі;
- на затінених балконів та терас будинків, а також
- у заболочених ділянках природного зростання *C. palustris in situ*, як місць застосування електробіотехнології.

А також,

- вивчити вплив кількості опадів на генерацію біоелектрики;
- ефект *L. terrestris* як можливого підсилювача біоелектропродуктивності;
- дослідити залежність генерації біоелектрики від ступеню розвитку рослин.

7.1 Вплив вологи на генерацію біоелектрики біосистемами з *C. palustris* під час літніх місяців *in situ*

Для визначення можливості використання *C. palustris* в електробіотехнологіях було досліджено біоелектричні показники її біосистем у ґрунті, в якому росте рослина *in situ* в її природних місцезростаннях в заболочених ділянках українського Полісся та Карпат. Середня напруга дослідних зразків становила 1125.4 ± 29.8 мВ, максимально і мінімально зафіксований – 1454.1 мВ та 1020.2 мВ, середня сила струму становила 9.1 ± 0.3 мА, максимальна і мінімальна – 11.2 мА та 3.4 мА, відповідно (рис. 7.1.1).

Щоб оцінити перспективи отримання біоелектрики з природних місцезростань *C. palustris* впродовж літа реєструвалися покази напруги та сили струму. Заболочені ділянки з *C. palustris*, які ніяк не експлуатуються, є широко поширені в українських ландшафтах і могли би служити джерелом біоелектрики за умов монтування в них вдосконалених багатоелектродних біосистем, що дозволяють максимілізувати збір електронів та протонів.

На початку літа дослідні зразки *in situ* з розвинутими кущами *C. palustris* характеризувались високими значеннями, як напруги відкритого кола, так і сили струму (рис.7.1.2): середній біоелектричний потенціал перевищував 1.1 ± 0.03 В, а середня сила струму була 9.9 ± 0.4 мА.

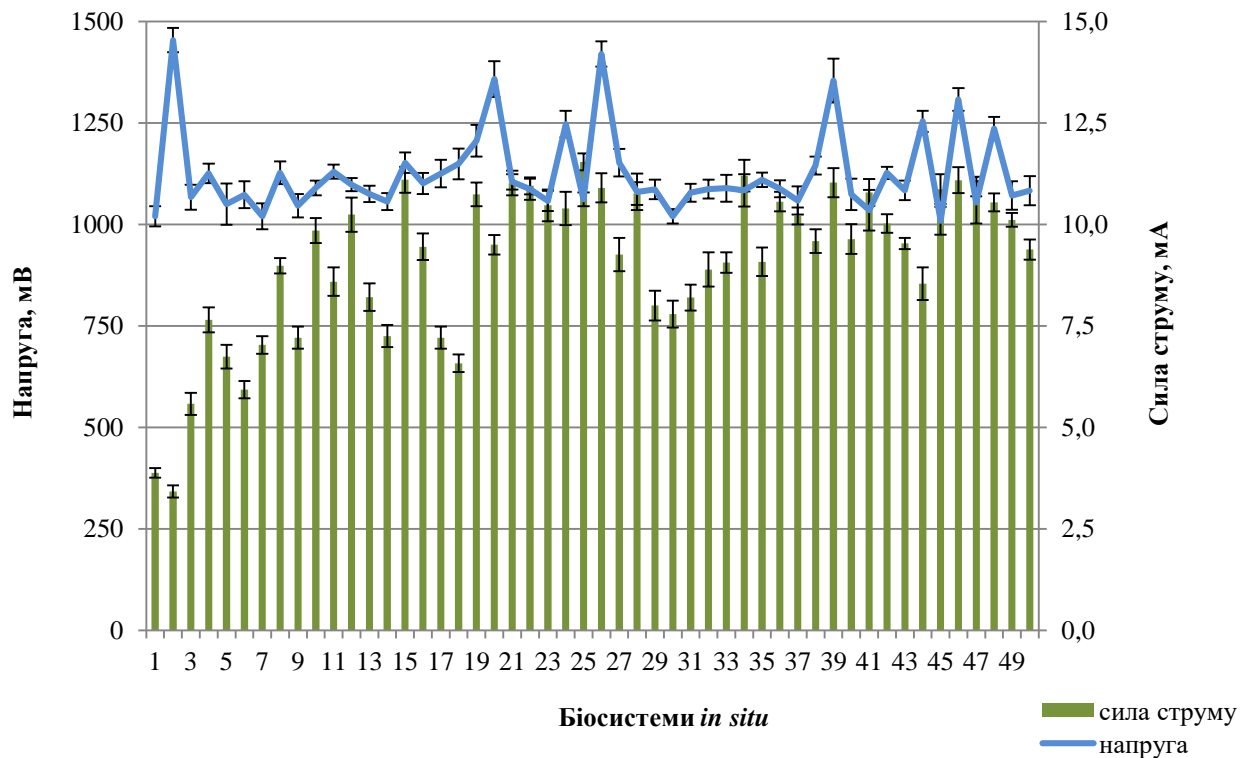


Рис. 7.1.1 Середні значення біоелектричних параметрів 50-ти різних біосистем із *C. palustris* у заболочених ділянках *in situ* українського Полісся та Карпат ($x \pm SE, n=10$)

Тривала посушлива погода, яка встановилася всередині липня: відсутність дощів та висока температура повітря привели до всихання рослин та втрати ними листяної маси, що супроводжувалося зниженням рівня біоелектричних показників: сила струму становила 45.7% – 64.7% від значень, які були в оптимальних умовах, а біоелектричний потенціал від 59.7% до 77.9% відповідно. В деяких випадках, падіння значень сили струму та біоелектричного потенціалу було майже вдвічі (рис. 7.1.2). Менше 2 мм опадів на день виявилися критичним значенням для рівня біоелектричних показників екосистем з калюжницею болотяною.

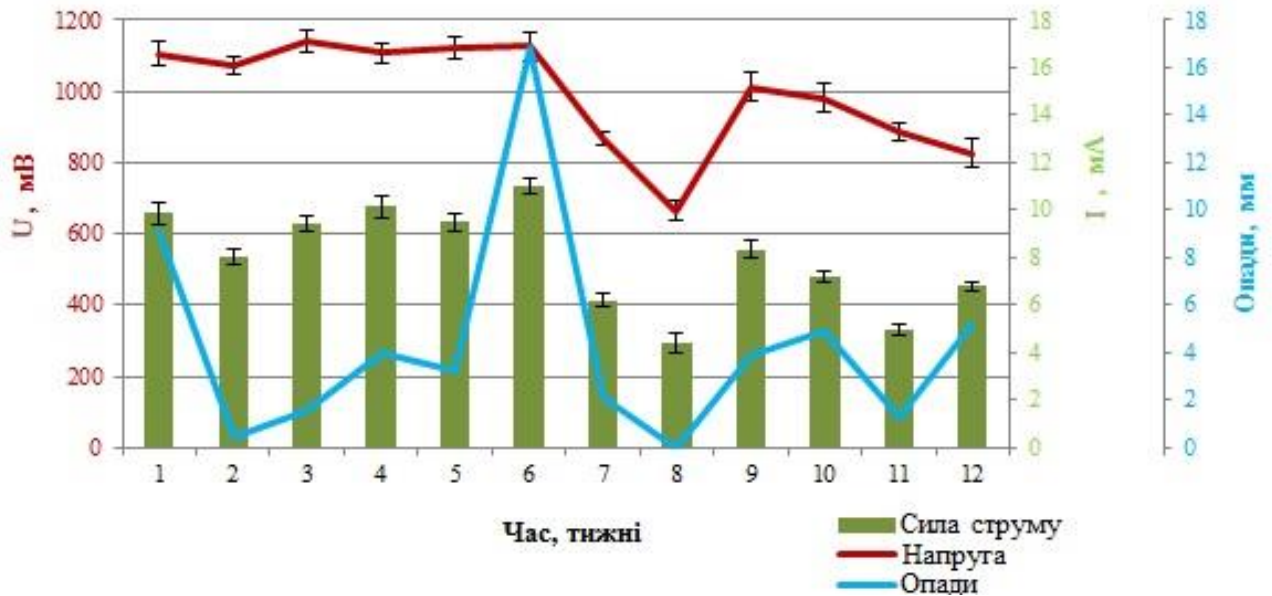


Рис. 7.1.2 Динаміка рівня напруги та сили струму біосистем з *C. palustris in situ* протягом літнього періоду ($\bar{x} \pm SE$, $n=10$).

Під час тривалих посушливих тижнів (7-ого, 8-ого всередині липня та 10-ого, 11-ого всередині серпня), які супроводжувалися високими середніми температурами спостерігалось зниження рівня біоелектрики

На початку серпня за сприятливих умов рослини відновилися, з'явилися молоді листки, що інтенсивно розвивалися. Разом з відновленням рослин рівень напруги та сили струму став підніматися, наближаючись до вихідних значень зразків розвинутих кущів в оптимальних умовах (рис. 7.1.2). Проте всередині серпня нова засуха привела до повторного всихання молодих рослин та чергового зниження рівня біоелектрики. Внаслідок другої посухи середній рівень біоелектричного потенціалу знизився на рівень 80.3 %, а сили струму опустився на рівень 50.44 % від вихідних значень, що були в оптимальних умовах (рис. 7.1.2). Втрата до 30 % листяної маси незначно позначалася на генерації біоелектричного потенціалу та сили струму, зниження показників в середньому складало 2.2 % та 2.8 %, відповідно. Проте всихання рослин більше як на 30% супроводжувалося істотним зниженням як біоелектричного потенціалу (падіння

показників в середньому на 37.0 %), так і сили струму (на 30.1 %) (рис. 7.1.3). Було показано позитивний ефект впливу опадів на генерацію біоелектрики: коефіцієнт кореляції Пірсона сили струму та кількості опадів був високий та становив 0.62

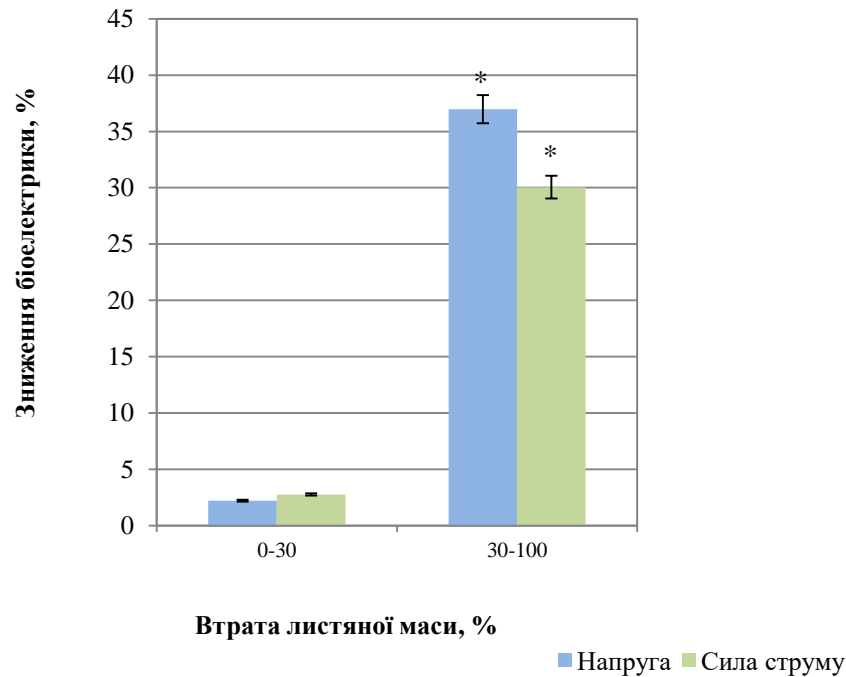


Рис. 7.1.3 Зниження показників біоелектрики із втратою листяної маси рослинами ($x \pm SE$, $n=10$).

*Втрата більше як 30 % кількості листків веде до істотного зниження генерації біоелектрики в порівнянні із зменшенням кількості листків в межах 0-30 % ($P < 0.05$)

7.2 Біоелектричні параметри біосистем з *S. palustris* на терасах та балконах будинків. Вплив розвитку рослин та анелід *L. terrestris* на ефективність біосистем

Умови терас та балконів будинків при регулярному поливі виявилися сприятливими для генерації біоелектрики біосистемами більшості рослин.

Болотисту рослину *C. palustris* можна успішно культивувати на відкритих терасах та балконах будинків з електродними системами. З метою виявлення вибагливості рослин до потреб в догляді було проведено тестування зразків в режимі нерегулярного поливу. Дослідження показало, що рослини чутливі до своєчасного зволоження ґрунту і всихають при його відсутності - при відсутності поливу рослини втрачали листяну масу. В рамках оцінки перспектив *C. palustris* в генерації біоелектрики на терасах та балконах будинків було проведення поляризаційні вимірювання, тестування із вимірюванням напруги відкритого кола та сили струму при навантаженні 10 Ω протягом місяця. В умовах короткотривалого навантаження генерація біоелектрики ґрунтовими зразками відбувалася наступним чином: максимальний рівень густини потужності,

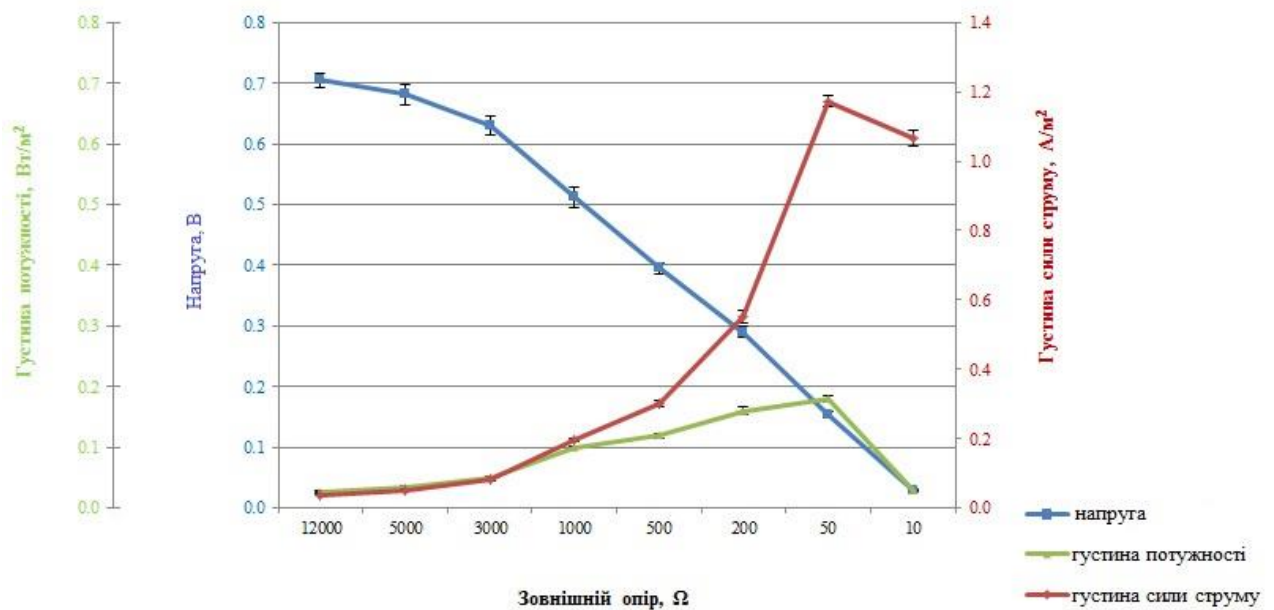


Рис. 7.2.1 Напруга, густина сили струму та густина потужності зразків, нормалізовані до 1 м² поверхні, охопленої рослинами та електродами при застосуванні зовнішніх резисторів ($x \pm SE$, n=20)

нормалізованої до поверхні, охопленої рослинами та електродами становив 0.16 - 0.18 Вт/м² при застосуванні зовнішніх резисторів 200 - 50 Ω , відповідно (рис. 7.2.1). Максимальне значення нормалізованої густини сили струму становило 1.2

А/м² при навантаженні 50 Ω (рис. 7.2.1). В умовах відкритого кола у зразках без рослин був визначений невисокий рівень біоелектричного потенціалу на рівні 615.5 мВ та сили струму – 0.9 мА при 10 Ω, що є результатом метаболічної активності ґрунтових мікроорганізмів в багатому органікою ґрунтовому субстраті (рис. 7.2.2, 7.2.3). Середні значення біоелектричного потенціалу у зразках з *C. palustris* були вищі, від контрольних, без рослин, майже в 2 рази ($P < 0.05$) та дещо вищі, ніж *in situ*: 1226.1 мВ на балконах будинків супроти 1125.4 мВ *in situ*. Максимально отримані показники напруги на терасах та балконах будинків були дещо нижчими, ніж зафіксовані в природних місцезростаннях, 1375.3 мВ супроти 1454.1 мВ *in situ*.

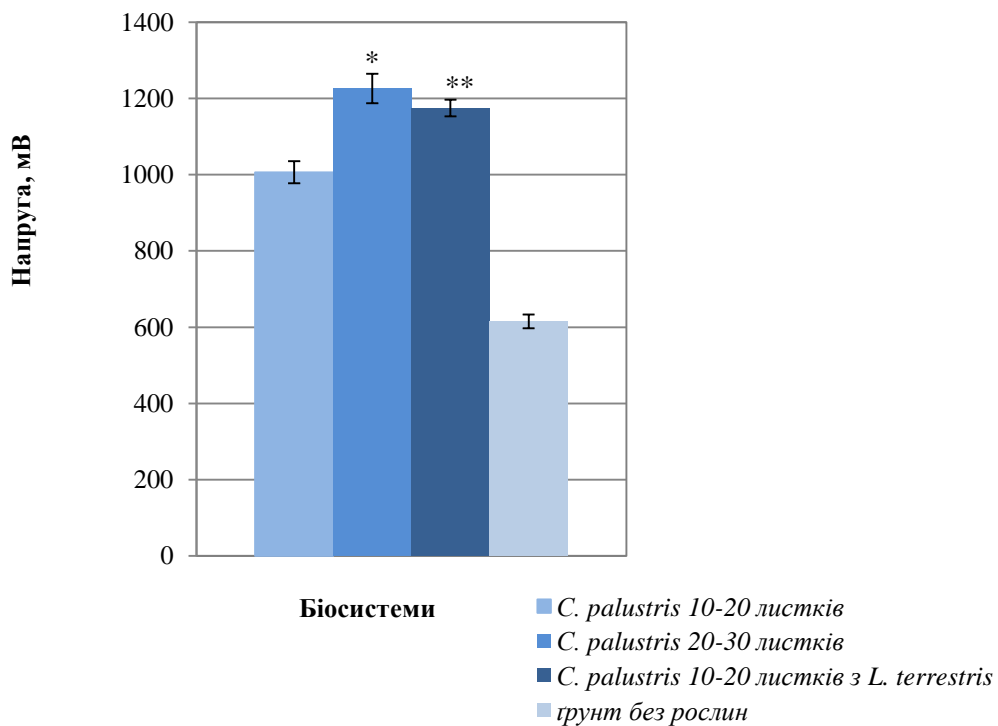


Рис. 7.2.2 Середня напруга біосистем з *C. palustris* на терасах та балконах будинків впродовж одного місяця ($x \pm SE$, $n=10$): слабо розвинуті кущі рослин містили 10 – 20 листків, добре розвинуті 20 – 30 листків.

*Напруга сильно та слабо розвинутих кущів рослин відрізнялася суттєво

** Напруга суттєво зростала з додаванням *L. terrestris* до слабо розвинутих кущів ($P < 0.05$)

З'ясовано, що для отримання високих показників біоелектричних параметрів, напруги та сили струму важливим є розвинутість куща рослини. Зразки із добре розвинутими кущами з кількістю листків від 20-ти до 30-ти, характеризувалися вищими значеннями біоелектричного потенціалу та сили струму, ніж слабо розвинуті кущі із кількістю листків від 10-ти до 20-ти ($P < 0.05$) (рис. 7.2.2, 7.2.3).

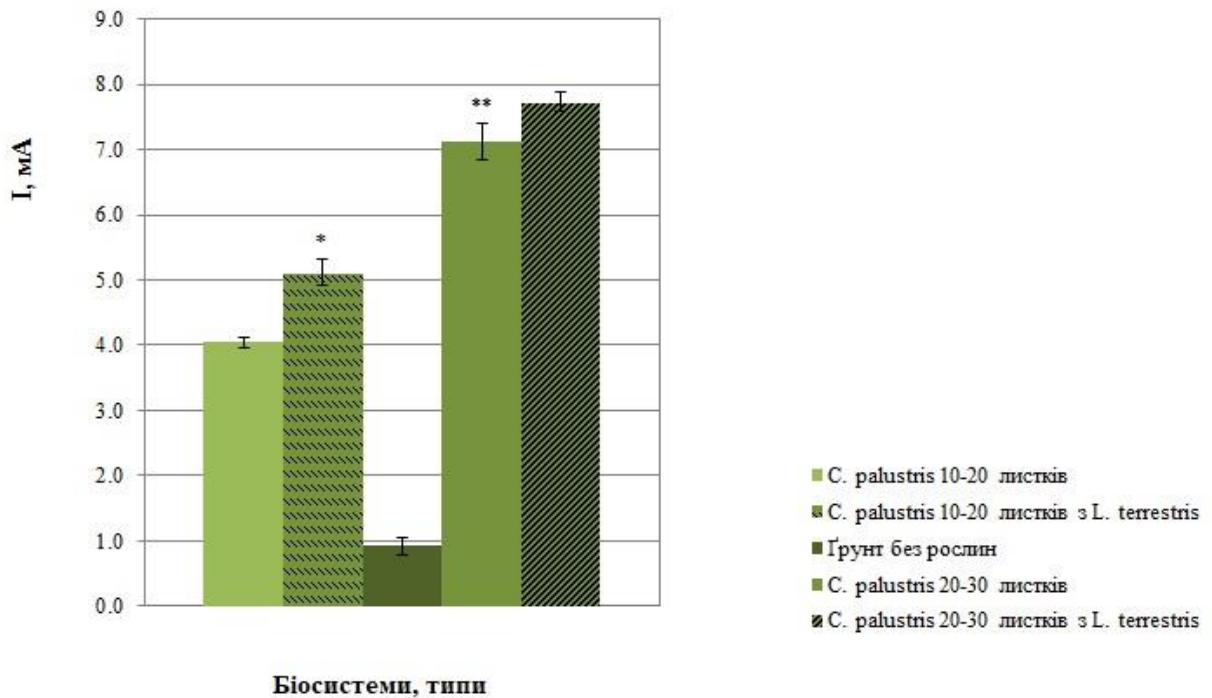


Рис. 7.2.3 Середня сила струму біосистем з *C. palustris*, культивованої на затінених терасах та балконах впродовж одного місяця ($\bar{x} \pm SE$, $n=10$).

*Сила струму у біосистем з інтродукцією *L. terrestris* та

** біосистем з найбільш розвинутою листяною масою є суттєво вищою в порівнянні із слабо розвинутими кущами та ґрунтом без рослин ($P < 0.05$)

Середнє значення напруги біосистем із добре розвинутими кущами становило 1226.1 ± 38.6 мВ, в той час як середнє значення біоелектричного потенціалу зразків з малолистими кущами – 1006.5 ± 29.2 мВ (рис. 7.2.2). Середня сила струму зразків з активно розвинутими рослинами перевищує середню силу струму зразків із мало листими на 16.1 % (рис. 7.2.3). Очевидно,

високий рівень фотосинтетичної активності у інтенсивно розвинутих кущів індукує більш потужну кореневу секрецію органічних речовин, що є субстратами для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів.

Ще одним фактором, що сприяє підвищенню рівня біоелектричних показників біосистем з калюжницею болотною на балконах будинків є додавання в ґрунт з рослинами аннелід *L. terrestris*. В зразках з однаково розвинутими рослинами, в пробах з *L. terrestris* біоелектричний потенціал та сила струму були вищими. Внесення *L. terrestris* в ґрунтові зразки з слабо розвинутими кущами рослин *S. palustris* приводило до зростання рівня біоелектричного потенціалу в середньому на 168.3 мВ (14.32%) та сили струму на 0.6 мА (рис. 7.2.2, 7.2.3). Такий ефект зумовлений, ймовірно, наближенням умов до природних, створенням центрів мікробіологічної активності та оптимальних умов для електрико-генеруючих мікроорганізмів гідрофільними продуктами життєдіяльності *L. terrestris*.

7.3 Перспективи генерації біоелектрики електро-біосистемами із *S. palustris* і *L. terrestris* в енергоефективних будинках та на заболочених ділянках *in situ*

Зразки з *S. palustris* в її природних місцезростаннях в заболочених ділянках українського Полісся та Карпат характеризувалися одними з найвищих значень напруги та сили струму серед досліджених нами зразків *in situ*. Високі значення біоелектричного потенціалу та сили струму біосистем з *S. palustris in situ* роблять рослину перспективним біокомпонентом в біотехнологічних системах генерації біоелектрики.

Проте, в природних місцезростаннях рослини більшість часу протягом літа генерація біоелектрики ризосферними мікроорганізмами *S. palustris* відбувалась не на повну потужність через несприятливі посушливі та високо температурні умови. В динамічній картині спостерігалися кілька тижневі падіння значень біоелектричного потенціалу та сили струму. Біоелектричні показники болотистих місцезростань *S. palustris* під час посушливих місяців літа, липня та серпня

знижувалися аналогічно, як і під час літньої засухи в лісових болотах (Dai et al., 2015). Тривала посушлива та спекотна погода приводила до всихання рослин. Втрати листяної маси калюжницею болотяною більше як на 30% супроводжувалося зниженням рівня біоелектричних показників. При відновленні оптимального рівня зволоження, більше 2 мм на день, рослини відновлювалися, разом з цим рівень біоелектричних параметрів піднімався, наближаючись до вихідних значень. Як показано і в роботах (Hubenova & Mitov, 2012) сила струму залежить від фізіологічної стадії рослини та знижується при загибелі рослин. Часті погодні аномалії в зв'язку з глобальною зміною клімату: тривалі посухи та періоди спеки, що стали частими для України, як країни, якій завжди був характерний помірний клімат, перешкоджають перспективі стабільного використання заболочених ділянок з *S. palustris* як джерела екологічної біоелектрики без вживання спеціальних заходів. Природні місцезростання *S. palustris* можуть ефективно експлуатуватись як джерело рослинно-мікробної біоелектрики за умови нетривалих періодів посухи, що супроводжуються лише частковою втратою листяної маси або ж за умов встановлення на них систем поливу.

Рослини *S. palustris* можна успішно культивувати на затінених терасах та балконах будинків як компонент біосистем, проте враховувати їх потреби в догляді, для повноцінного розвитку калюжниці болотяної важливим є своєчасний полив. Можливість використання універсального ґрунтового субстрату для отримання біоелектрики з калюжницею болотяною дозволяє отримати дешеву біотехнологію, оскільки не потребує специфічних коштовних середовищ. Середня сила струму зразків на терасах була нижчою в 2.2 рази, ніж середня сила струму зразків *in situ*. Вимірюючи силу струму у зразках природних місцезростань *S. palustris* високогір'я ми стикались з подібними низькими значеннями сили струму, що може бути наслідком відсутності оптимальних умов зростання або ж етапу відновлення рослини після всихання. Ймовірно, на терасах світлення не було оптимальним для розвитку рослин. Одним з факторів, яким відрізнялися умови на затінених балконах та терасах будинків від умов природного

місцезростання, було нижче освітлення. Як показано (Hubenova & Mitov, 2012), сила струму залежить від рівня освітлення зразків. Менш інтенсивний фотосинтез в умовах низького освітлення приводить до того, що всі органічні речовини ідуть лише на забезпечення потреб рослини. В цих умовах нема великого надлишку насинтезованих органічних речовин і відповідно, секреція органічних речовин в ґрунт є слабкою, що приводить до істотного зниження активності електрико-генеруючих мікроорганізмів та зниження генерації ними сили струму.

Хоч рівень біоелектрики, генерованої ґрунтовими мікроорганізмами у зразках з *C. palustris* на затінених терасах та балконах будинків є нижчим, ніж в природних місцезростаннях рослини, проте є вищим, ніж в інших досліджених нами біосистемах з іншими рослинами. Тому, є підстави сподіватися на досягнення вищих показників біоелектрики на рівні значень в природних місцезростаннях *C. palustris* при підборі як більш оптимальних умов культивування на балконах і терасах будинків, так і при використанні вдосконалених багатоелектродних систем, максимілізуючих збір біоелектрики. В цьому дослідженні перспектив генерації біоелектрики, індукованої *C. palustris in situ* та в універсальному ґрунтовому середовищі на затінених балконах і терасах, загальні закономірності та тенденції генерації біоелектрики були вивчені за допомогою двоелектродної системи, використовуваної в подібних скринінгових дослідках. З метою виконання дешевих масштабних експериментів ми не ставили собі за завдання використовували розроблені нами більш складні та більш ефективні багатоелектродні системи, які дозволяють більш максимально зібрати біоелектрику. Ще одними факторами підвищення рівня генерації біоелектрики електробіосистемами з калюжницею болотяною є внесення аннелід *L. terrestris* та підтримання активного розвитку листяної маси рослин.

Хоч отримані нами показники біоелектрики є високі в порівнянні з іншими зразками, але, поки що отриманий рівень біоелектричного потенціалу та сили струму є низьким для практичного енергоємного застосування біотехнології. Однак, обчислений можливий теоретичний максимум технології (Strik et al., 2011) та роботи науковців цілого світу в цій галузі, в тому числі наші розробки нових

електродних систем, дають підстави розраховувати, що електробіотехнології з *C. palustris* мають перспективи використання як для низькоенергоємких потреб: LED освітлення паркових зон (Schultz, 2014; Lu et al., 2015) і терас будинків, підзарядки польових пристроїв, екологічних датчиків та сенсорів в полі (Tender et al., 2008; Zhang et al., 2011), підтримки он-лайн систем моніторингу за природними екосистемами (Dai et al., 2015), так і в подальшому, для облаштування електрифікованих станцій дикого туризму в природних парках з можливістю підзарядки мобільних телефонів, ноутбуків, акумуляторів фотоапаратів, електричних велосипедів, та для масштабних енергоємних потреб, таких як повного енергозабезпечення будинків та цілих сіл (Wetser, 2016).

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександрові Медведєву за консультації та магістрам екологам Вікторії Вакулюк та Ользі Бур'ян за допомогу в реєстрації біоелектричних показників, Ігорю Селецькому, Назару Стемпіцькому і Богдану Валько за технічну допомогу в експериментах та конструюванні систем збору біоелектрики.

Висновки до розділу 7

Дана робота є вихідною для подальшої розробки ефективної рослинно-мікробної біосистеми генерації біоелектрики з *S. palustris*. Калюжниця болотяна є перспективним біокомпонентом електробіотехнологічних систем. Біосистеми з рослиною характеризуються найвищими значеннями біоелектричних показників без застосування резисторів серед досліджуваних нами зразків *in situ*: максимальні значення напруги відкритого кола 1454 Мв та сили струму короткого замикання 11.20 мА в оптимальних умовах у природних місцезростаннях. Рослина є першоцвітом і зимостійкою рослиною, що відкриває можливість експлуатувати біосистеми з *S. palustris*, що широко поширена в заболочених ділянках українського ландшафту, з ранньої весни. Рослини *S. palustris* можна успішно культивувати в універсальному ґрунтовому субстраті на терасах та балконах будинків як компонент електробіосистеми із обов'язковим регулярним поливом та отримувати електроенергію безпосередньо в будинку. Експлуатація електробіосистем з *S. palustris* в заболочених місцевостях *in situ* супроводжується зниженням біоелектричних показників під час посух та високих температур. Виявлена нами чутливість генерації біоелектрики до рівня вологи ґрунту, інтенсивності розвитку листяної маси рослини, позитивна реакція на внесення *L. terrestris* важливі для оптимізації умов культивування *S. palustris* для ефективного отримання біоелектрики. Позитивний ефект анелід *L. terrestris* як біопідсилювачів продукції біоелектрики електробіосистем складав 14.32%. Позитивна кореляція кількості опадів на генерації біоелектрики висока і становила 0.62. Втрата більше як 30 % листяної маси куща рослин є критичними для генерації біоелектрики біосистемами з *S. palustris*.

Монтування вдосконалених електродних систем, що дозволять максимально зібрати рослинно-мікробну біоелектрику в природні місцезростання *S. palustris* та будинкові території: тераси та балкони дозволяє використовувати їх як джерело біоелектрики. Заболочені ділянки *in situ*, які ніяк не експлуатуються та є широко поширеним в ландшафті як європейських так і північно-американських країн, а

також, балкони і тераси будинків, окрім відповідно, природно-заповідного і відпочинкового призначення, зможуть набути важливого енергетичного значення.

Матеріали розділу опубліковані в публікаціях:

Rusyn, I. B., Vakuliuk, V. V., & Burian, O. V. (2019). Prospects of use of *Caltha palustris* in soil plant-microbial eco-electrical biotechnology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10 (2), 233-38.
doi:10.15421/021935. **Web of Science**

Література до розділу 7

- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J. E., Cluzeau, D., & Brun, J.-J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, *64*(2), 161–182. doi: 10.1111/ejss.12025
- Chen, Z., Huang, Y. C., Liang, J. H., Zhao, F., & Zhu, Y. G. (2012). A novel sediment microbial fuel cell with a biocathode in the rice rhizosphere. *Bioresource Technology*, *108*, 55–59. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.040
- Dai, J. , Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, *7*, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- De Schamphelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, *42*(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- Dennis, P. G., Miller, A. J., & Hirsch, P. R. (2010). Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? *FEMS Microbiology Ecology*, *72*(3), 313–327. doi: 10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (Eds). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. doi: 10.1201/b10453-11
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, *101*(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2011). New plantgrowth medium for increased power output of the Plant-

- Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 104, 417–423. doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.005
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, 5, 70. doi: 10.1186/1754-6834-5-70
- Helder, M., Chen, W. S., Van Der Harst, E. J. M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Buisman, C. J. N., & Potting, J. (2013). Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 7, 52–64. doi: 10.1002/bbb.1373
- Hutsch, B. W., Augustin, J., & Merbach, W. (2002). Plant rhizodeposition – an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4), 397–407.
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2012). Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 87, 185–191. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008
- Jones, D. L., Hodge, A., & Kuzyakov, Y. (2004) Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*, 163, 459–480. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01130.x
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Khomyakov, N. V. (2009). Deystviye pishchevaritelnoy zhidkosti dozhdevykh chervey na mikroorganizmy [Effect of digestive fluid of earthworms on microorganisms]. PhD Thesis, Moscow, p.112 (in Russian).
- Kuijken, R. C. P., Snel, J., Bouwmeester, H., & Marcelis, L. F. M. (2011). Quantification of exudation for the plant-microbial fuel cell. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 76(2), 15–18.
- Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000) Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 163(4), 421–431. . doi: 10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R

- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, *172010*, 1–10. doi:10.1155/2013/172010
- Lovley, D. R., Ueki, T., Zhang, T., Malvankar, N. S., Shrestha, P. M., Flanagan, K. A., Akujkar, M., Butler, J. E., Giloteaux, L., Rotaru, A. E., Holmes, D. E., Franks, A. E., Orellana, R., Risso, C., & Nevin, K. P. (2011). Geobacter: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *Advances in Microbial Physiology*, *59*, 1–100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5.
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *195*, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Lynch, J. M., & Whipps, J. M. (1990) Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, *129* (1), 1–10.
- Moroziuk, S. S., & Protopova, V. V. (2007). Travianysti roslyny Ukrainy [Herbaceous plants of Ukraine]. Bogdan, Ternopil (in Ukrainian).
- Moqsud, M. A., Yoshitake, J., Bushra, Q. S., Hyodo, M., Omine, K., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, *36*, 63–69. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.004
- Nitorisavut, R., Thanh, C. N. D., & Regmi, R. (2017). Microbial fuel cells: Advances in electrode modifications for improvement of system performance. *International Journal of Green Energy*, *14*(8), 712–723. doi.org/10.1080/15435075.2017.1326049
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, *186*, 270–275. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.014
- Picot, M., Lapinsonniere, L., Rothballer, M., & Barriere, F. (2011). Graphite anode surface modification with controlled reduction of specific aryl diazonium salts for improved microbial fuel cells power output. *Biosensors & Bioelectronics*, *28*, 181–188. doi: 10.1016/j.bios.2011.07.017

- Rothballer, M., Engel, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Schloter, M., & Hartmann, A. (2011). Comparison of bacterial rhizosphere communities from plant microbial fuel cells with different current production by 454 amplicon sequencing. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 76(2), 31–32.
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2016). Sposib otrymannia biolohichnoi elektryky z hlybyunnykh shariv gruntu [Biological method of producing bioelectricity from deep soil layers]. Patent of Ukraine 112093, filed March 9, 2016, issued December 12, 2016 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymannia bioelektryky iz konteinera z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodov [The method for bioelectricity obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).
- Schuettpelz, E., & Hoot, S. B. (2004). Phylogeny and biogeography of *Caltha* (*Ranunculaceae*) based on chloroplast and nuclear DNA sequences. *American Journal of Botany*, 91(2), 247–253.
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. doi:10.1002/er.1397
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001.
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, 74, 1271–1273. doi: 10.1271/bbb.90852
- Tender, L. M., Gray, S. A., Groveman, E., Lowy, D. A., Kauffman, P., Melhado, J., Tyce, R. C., Flynn, D., Petrecca, R., & Dobarro, J. (2008). The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, 179 (2), 571–575. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.123

- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology & Biotechnology*, *86*(3), 973–981. doi: 10.1007/s00253-010-2440-7
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schlöter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, *94*(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, *83*, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006
- Wetser, K. (2016). Electricity from wetlands: Technology assessment of the tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode. Part two: PMFCs applied in wetlands. Wageningen University, Wageningen.
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, *185*, 642–649. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122
- Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, *47*, 126–131. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.06.029
- Zhang, F, Tian, L, & He Z. (2011). Powering a wireless temperature sensor using sediment microbial fuel cells with vertical arrangement of electrodes. *Journal of Power Sources*, *196*, 9568–9573. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.07.037

Розділ 8. Біосистеми, базовані на мохах на зелених дахах енергоефективних будинків

Технологія облаштування дахів з рослинним покриттям, так званих зелених дахів, як на даху приватного будинку, так і на міських багатоповерхівках набула популярності останнім часом як один із нових архітектурних підходів в плані урбанізації, що впливає з концепцій сталого розвитку міста (Kohler, 2005; Fotouchi, 2015; Konyuhov et al., 2019). Кількість зелених дахів стрімко зростає щороку у всьому світі. У Японії площа зелених дахів зросла в 29 раз з 2000 до 2013 року (Kuronuma et al., 2018). Як частина стратегії вуглець нейтрального міста до 2025 року Копенгаген (Данія) став першим скандинавським містом, що прийняв політику, що вимагає облаштування зелених дахів на всіх дахах нових будинків з кутом менше 30 % (Chino, 2010). З 2016 року в Кордобі, Аргентина, всі нові та існуючі дахи площею понад 400 м² мають бути перетворені в зелені. В Конектикуті (США) індустрія зелених дахів зростає на 35 % щороку з 2007 р. (Lubell et al., 2013).

Зелені дахи додають необхідні додаткові зелені площі заощеним бруківкою містам, знижуючи рівень забруднення атмосфери, зберігаючи біорізноманіття видів та позитивно впливаючи на клімат урбоєкосистем (Getter & Rowe, 2006; Yang et al., 2008). Зелені дахи в містах є важливим інструментом у боротьбі з наслідками глобальної зміни клімату, знижуючи температуру міського острова тепла (Banting et al., 2005; Alexandri & Jones, 2006) та знижуючи концентрацію парникових газів (Clark et al., 2005; Dimitrijevic et al., 2018; Kuronuma et al., 2018), вирішуючи проблему стоку дощової води, знижуючи загрози затоплення (Mentens & Hermy, 2006; Konasova, 2014), ізолюючи будинки від зимового холоду та літньої спеки (Theodosiou, 2003; Konyuhov et al., 2019), тим самим, зменшуючи CO₂ залежні енергозатрати на опалення та кондиціонування (Oberndorfer et al., 2009; Castleton et al., 2010). Крім цього, зелені дахи є перспективними в плані отримання біоелектрики (Helder et al., 2013a). Суть отримання біоелектрики з зелених дахів полягає в тому, що ґрунтові електрико-генеруючі мікроорганізми

продукують біоелектрику, утилізуючи органічні речовини, що виділяються в субстрат через кореневу систему активно фотосинтезуючими рослинами, які ростуть на зелених дахах (De Schampelair et al. 2008; Kaku et al. 2008; Strik et al., 2008) чи в процесі розпаду органічного опаду рослин (Timmers et al., 2012; Dai et al., 2015).

Основна маса робіт з біоелектричними рослинно-мікробними біосистемами, в тому числі, для зелених дахів, проводиться в болотистих чи синтетичних субстратах (Helder et al., 2010; Timmers et al., 2012; Yadav et al., 2012; Liu et al., 2013), із вищими рослинами, в основному, мешканцями болотистих місцезростань (Lu et al., 2015; Oon et al., 2015; Wetser et al., 2015). Вимогами до рослин екстенсивних зелених дахів є стресотолерантність: витривалість в умовах лімітованої площі для розвитку коренів та низьких поживних запасів, стійкість до інтенсивного сонячного випромінення та впливу вітру, посухостійкість і морозорезистентність (Getter & Rowe, 2006; Oberndorfer et al., 2009; Konasova, 2014). Найбільш дослідженою та широковикористовуваною рослиною для екстенсивних зелених дахів є низькоростучі види сукуленту роду *Sedum* (Monterusso et al., 2005; Rowe et al., 2005; Tapia et al., 2017). Мохи мають високі перспективи як кандидати для екстенсивних зелених дахів (Studlar & Peck, 2009; Konasova, 2014) через їх стресостійкість та невибагливість, можливість сформувати суцільний килим на покрівлі (Cooper, 1975; Atherton et al., 2010; Buck & Goffinet, 2000) та здатність генерувати біоелектрику (Bombelli et al., 2016). Тому, як компонент електро-біосистем для зелених дахів нами було обрано широко поширені види мохів, досі мало вивчені в плані електропродуктивності на дахах, а як субстрат для їх розвитку – універсальний ґрунтовий субстрат.

Технологія отримання рослинно-мікробної біоелектрики потребує вдосконалення через низьку продуктивність та вимерзання рослин взимку на дахах (Helder et al., 2013b; Wetser et al., 2017). Оскільки мохи є морозостійкими рослинами, використання їх в якості біокомпонента електро-біосистем зелених дахів могла би вирішити дану проблему. В своїй роботі ми поставили собі завдання з'ясувати:

- 1) перспективність використання мохів як біокомпонента електро-біосистем з розробленими нами графітовими та оцинково-сталевими електродними системами (Rusyn & Medvediev, 2018) на зелених дахах у ґрунтових субстратах,
- 2) дослідити генерацію ними біоелектрики на протязі осінньо-зимового-весняного періоду під час заморозків та посушливих періодів та
- 3) оцінити роль конфігурації електродних систем для отримання біоелектрики.

8.1 Вплив температури на генерацію біоелектрики біотехнологічними системами з мохами

На генерацію біоелектрики біосистемами в зовнішніх умовах на дахах має суттєвий вплив весь комплекс метеофакторів, зокрема, особливу вагу має температура повітря, кількість опадів, кількість сонячного освітлення та пов'язаний з ними стан рослин, життєздатність рослин в умовах різкого коливання температур та рівня вологості. Метеоумови впливають на інтенсивність фотосинтезу рослинами, розвиток рослин та ґрунтових мікроорганізмів, в тому числі електрико-генеруючих. Вплив метеофакторів на а силу струму був істотним.

На початку осені, в умовах середньодобової температури вище $+10^{\circ}\text{C}$, сила струму в біосистемах з мохами становила від 16.28 мА до 22.71 мА та утримувалася на такому рівні протягом майже всієї осені. Вкінці жовтня із зниженням середньодобової температури та з регулярними нічними заморозками сила струму у біосистемах опустилася в середньому до 10.71 мА (рис. 8.1.1).

Пізньюосінній та зимовий період, з кінця листопада до кінця лютого, характеризувався періодами мінусових середньотижневих температур: від -0.60°C до -3.77°C , що чергувалися періодами плюсових середньотижневих температур від $+1.85^{\circ}\text{C}$ до $+4.41^{\circ}\text{C}$. Під час пізнього осінньо-зимового періоду, сила струму опустилася ще нижче та утримувалася на низькому рівні, в середньому 3.52 мА. В цей час біоелектрика продукується переважно за рахунок джерел електронів, які

утворюються в результаті розкладу рослинного опаду та компонентів субстрату. Під час локальних періодів підвищення температури сила струму підвищувалася та суттєво знижувалася під час заморозків в порівнянні з вересневими значеннями ($P < 0.05$) (рис. 8.1.1). Так, вкінці грудня при тривалому підвищенні температури повітря до середньотижневого $+4.40^{\circ}\text{C}$ середня сила струму піднялася до 11.39 мА та під час тривалих періодів мінусових температур протягом всіх зимових місяців знижувалася в середньому до 0.45 – 0.69 мА. У перші два місяці весни, середньодобова температура все ще була низькою, близькою до температур зимових відлиг та в середньому становила лише $+3.97^{\circ}\text{C}$. В цей час сила струму дещо піднялася і в середньому становила 6.04 мА, що становило лише 31.37% від середніх значень початку осені.

Виражений підйом значень сили струму став спостерігатися у травні, коли середньодобова температура піднялася вище $+10^{\circ}\text{C}$, випала значна кількість опадів, збільшилась кількість сонячних днів та рослини відновили свій розвиток. У травні в частини електро-біосистем сила струму піднялася до вихідних значень, що були на початку осені та становила в середньому 17.70 мА ($p > 0.622$) (рис. 8.1.1). Інші ж електро-біосистеми після зимівлі так і не відновили рівня сили струму, що був в них на початку осені, через вимерзання рослин та пошкодження з'єднань електродів під тиском замерзлої води. Непрацюючі електро-біосистеми містили як нежиттєздатні рослини, так рослини, що продовжували свій розвиток. В першому випадку, заміна вимерзлих та висушлих мохів на нові життєздатні рослини приводило до відновлення генерації струму. Проте, в ряді випадків, електро-біосистеми потребували ремонту електродних систем. Заміна пошкоджених з'єднань катодних систем в непрацюючих електро-біосистемах із активними мохами без заміни рослинного покриву приводило до відновлення їх роботи та електропродуктивності на вихідному рівні.

Нами виявлений пригнічуючий вплив на силу струму електро-біосистем з мохами температури нижче 10°C , яка часто виступала лімітуючим фактором і морозів та весняне зростання сили струму із підвищенням температури вище 10°C і розвитком рослин. Критичність температури 10°C для функціонування електро-

біосистем описана також Hong et al. (2009) та Dai et al. (2015). Li et al. (2013) продемонстрували, що лабораторні рослинно-мікробні електро-біосистеми найменш ефективно працювали при температурах нижче 10°C.

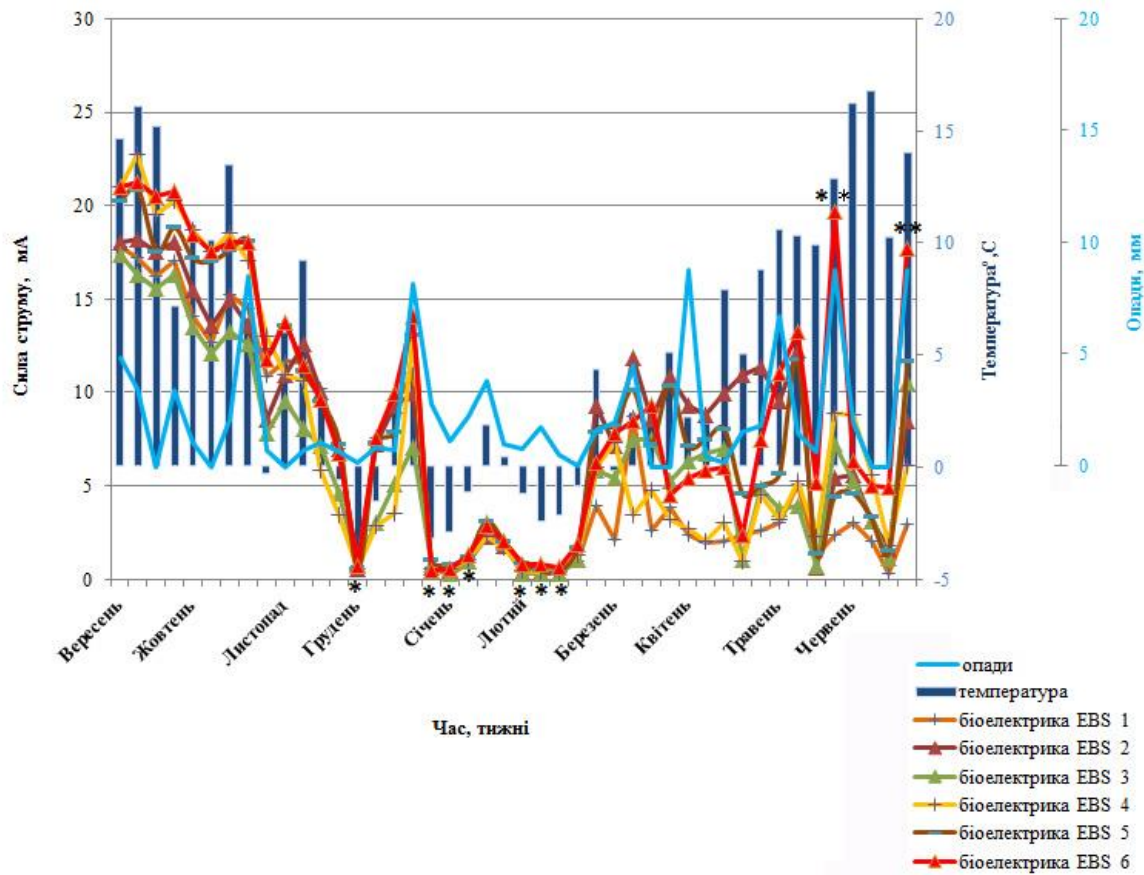


Рис. 8.1.1 Генерація сили струму біосистемами 6-ти різних конфігурацій (EBS 1-6) з мохами на протязі вересня - червня ($x \pm SE$, $n=20$).

*Зниження рівня сили струму електробіосистеми 6 (EBS 6) є істотним в періоди мінусових температур в порівнянні з вихідними значеннями вересня ($P < 0.05$)

** З підвищенням температури та збільшенням кількості опадів весною сила струму підвищується практично до вихідного значення вересня ($p > 0.622$)

Загальні тенденції динаміки напруги відкритого кола під час сезонних змін температури були подібними до залежності сили струму електро-біосистем від температури довкілля, але дещо менш вираженими в процентному відношенні.

Рівень біоелектричного потенціалу перевищував 1 В та становив в середньому 1032.67 ± 28.16 мВ з вересня та до середини жовтня, коли середньотижнева температура була в межах від $+10.16^{\circ}\text{C}$ до $+16.09^{\circ}\text{C}$ (рис. 8.1.2). Із зниженням середньодобової температури нижче $+10^{\circ}\text{C}$ та регулярними нічними заморозками із кінця жовтня спостерігається різке зниження рівня біоелектричного потенціалу нижче 1 В, яке утримується під час всієї зими та перших двох місяців весни. Зниження рівня напруги під час заморозків є статистично істотним в порівнянні з середнім вихідним значенням напруги біосистем вересня ($P < 0.05$). Під час періодів відлиги, плюсових температур взимку спостерігалися підйоми рівня біоелектричного потенціалу (рис. 8.1.2). Два виразні підвищення значень напруги електро-біосистем в грудні та в квітні до рівня вихідних значень в порівнянні з середніми зимовими значеннями на фоні субоптимальних значень температур пов'язані з тривалим періодом опадів ($P < 0.05$). З початку травня із підйомом середньодобової температури вище $+10^{\circ}\text{C}$ рівень біоелектричного потенціалу електро-біосистем істотно зріс ($P < 0.05$) та навіть перевищував вихідні середні значення осені, а в деяких випадках сягав лише 61.79 % від вихідних значень, що в останньому випадку було пов'язано із вимерзанням рослин та пошкодженням з'єднань електродів в частині електро-біосистем.

8.2 Вплив атмосферних опадів на функціонування біосистем з мохами на зелених дахах

Вплив кількості атмосферних опадів на генерацію напруги та сили струму проявляв себе сукупно з іншими метеофакторами. Подібно до досліджень Dai et al. в болотних електро-біосистемах Південної Кароліни у США (2015), нами виявлено зростання сили струму електро-біосистем після зливи, яка, очевидно, що створює сприятливі умови для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів, розчиняючи в ґрунті поживні речовини (Chow, 2006; Chow et al., 2013) та активізуючи фотосинтез самих мохів та секрецію їх продуктів метаболізму.

Вплив тривалих багатоденних злив та дощів тривалістю кілька днів поспіль, тиждень і більше підряд на генерацію біоелектрики був сприятливим за оптимальних температур. Особливо було помітним вплив затяжних багатоденних опадів, незначні опади мали менш виражений ефект. Так наприклад, 10-денний

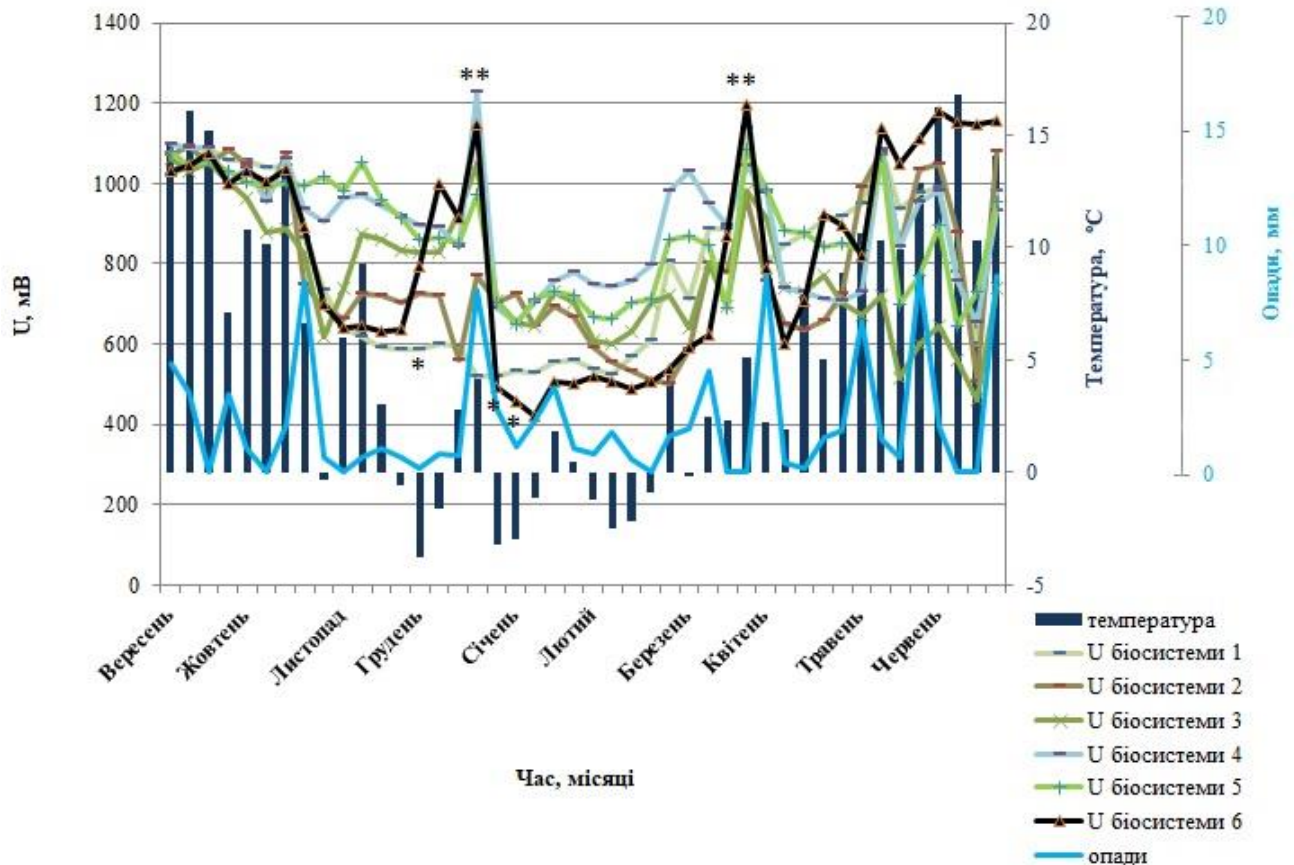


Рис. 8.1.2 Динаміка генерації напруги біосистем 6-ти різних конфігурацій з в залежності від кількості опадів та температури
($\bar{x} \pm SE, n=20$)

*Зниження рівня напруги під час заморозків є статистично істотним в порівнянні з середнім вихідним значенням вересня ($P < 0.05$)

**Два виразні піки підвищення значень напруги в грудні та квітні в порівнянні з середніми зимовими значеннями на фоні субоптимальних значень температур пов'язані з тривалим періодом опадів ($P < 0.05$)

період дощів з 17-ого по 27-ме грудня на фоні підйому середньодобової температури, коли за цей період випало 70.90 мм опадів привів до зростання біоелектричного потенціалу в середньому на 167.83 мВ, а сили струму – на 3.88 мА (рис. 8.1.1, 8.1.2) ($P < 0.05$). Сприятлива підвищена вологість з одночасно несприятливими температурними факторами та високою хмарністю супроводжувалися зниженням біоелектричного потенціалу та сили струму. Зокрема, 10-ти денний період дощів з 27-ого березня по 5-те квітня, який супроводжувався періодичними заморозками не мав позитивного ефекту на генерацію біоелектрики та сили струму (рис. 8.1.1, 8.1.2).

На протязі експерименту періодично мали місце посушливі періоди тривалістю до 10 – 15-ти днів. В умовах тривалої відсутності опадів значення біоелектрики знижувалося, незважаючи на оптимальні температури. Зокрема, в травні та червні, незважаючи на сприятливі температурні умови, сила струму різко коливалася, що тісно пов'язано з посушливими періодами та чутливістю мохів до вологості, які припиняли свою активність під час посушливих періодів та відновлювали свою активність і підтримку розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів після дощів (рис. 8.1.1). Подібна динаміка зафіксована в роботі (Dai et al., 2015), де під час посушливого періоду із липня по грудень біоелектрика не продукувалась.

В результаті майже 20-ти денного посушливого періоду у червні на фоні оптимальних температур локальне зниження сили струму складає в середньому 76.67 %, а напруги відкритого кола 28.56 % (рис. 8.1.1, 8.1.2). Мохи чутливі до відсутності дощів та поливу, при посухах вони знижують свою активність, припиняють секрецію поживних речовин необхідних для електрико-генеруючих мікроорганізмів, очікуючи сприятливого періоду. При відновленні необхідного для активності рівня вологи значення біоелектрики зростають.

Отже, протягом осінньо-зимово-весняного періоду контейнери з електро-біосистемами на зелених дахах перебували в складних погодних умовах: різких коливаннях температури, заморозках до -19°C та відлигах, тривалих засухах та зливах. Частка електро-біосистем, що успішно пережили несприятливі метео-

умови і вийшли після зимового періоду на вихідні значення біоелектричного потенціалу та відновили свої вихідні значення сили струму складала 16.71 % електро-біосистем. Це досить непоганий результат, отриманий в метеоумовах східноєвропейського міста Львів, Україна, враховуючи той факт, що вид рослин електро-біосистем в кліматичних умовах датської зими на дахах не пережив зими (Helder et al., 2013b).

8.3 Роль конфігурацій систем катодів та анодів в роботі біосистем з мохами

Найбільш ефективною серед проаналізованих конфігурацій електродних систем (рис. 2.2.4) виявилася електро-біосистема 6, що складалася з монолітного графітового катоду та поруч розташованої системи анодів, розміщених в глибині ґрунту під ризоїдами мохів. Нами було сконструйовано 5 конфігурацій електро-біосистем, де катоди були представлені поодинокими графітами, з'єднаними провідниками в єдину систему, що розташувалися з анодами під ризоїдами мохів для збільшення площі контакту електродів з ґрунтом, охоплення більшої площі циркуляції електронів. Теоретично, така конструкція дозволяє максимальніше збирати електрони, продуковані електрико-генеруючими ризосферними мікроорганізмами. Так, електро-біосистема 4 та електро-біосистема 5, де найбільш максимально була реалізована ця стратегія характеризувалися істотно вищими значеннями сили струму в осінній період, до заморозків, ніж електро-біосистеми 1 – 3 ($P < 0.05$) (рис. 8.1.1). Біосистеми, де конфігурація електродів забезпечувала в 1.65 рази більшу площу контакту з субстратом, дозволяли отримувати вищі в 1.22 рази значення біоелектрики.

Проте такі системи, із більшою кількістю з'єднань, як і електро-біосистеми 1 – 5, технологічно є більш вразливими до пошкоджуючої дії сили розширення замерзлої води, що пошкоджує контакти між електродами та в більшій мірі виходили з ладу після зимового періоду. Хоч площа електродної поверхні електро-біосистеми 6 є дещо меншою в порівнянні з площею електро-біосистем 1

– 5, функціональність електро-біосистеми з конфігурацією 6 в процесі експерименту в зовнішніх умовах була стабільною, а система електродів не зазнала пошкоджень, і весною, з відновленням активності рослин відновила вихідний рівень показників (рис. 8.1.1, 8.1.2).

Дослідження роботи електро-біосистеми 6 в умовах короткотривалого зовнішнього навантаження опорів були проведені в осінній період. До електро-біосистем короткотривало підключали резистори, починаючи від найбільшого, 12 к Ω , послідовно до найнижчого, 10 Ω . Біоелектричний потенціал опускався із зниженням навантаження, як і описано в Cheng et al., 2006, а густина сили струму зростала. Найвищі значення густини потужності 0.23 – 0.56 W/m² зафіксовані при опорах 500 – 50 Ω (рис. 8.3.1).

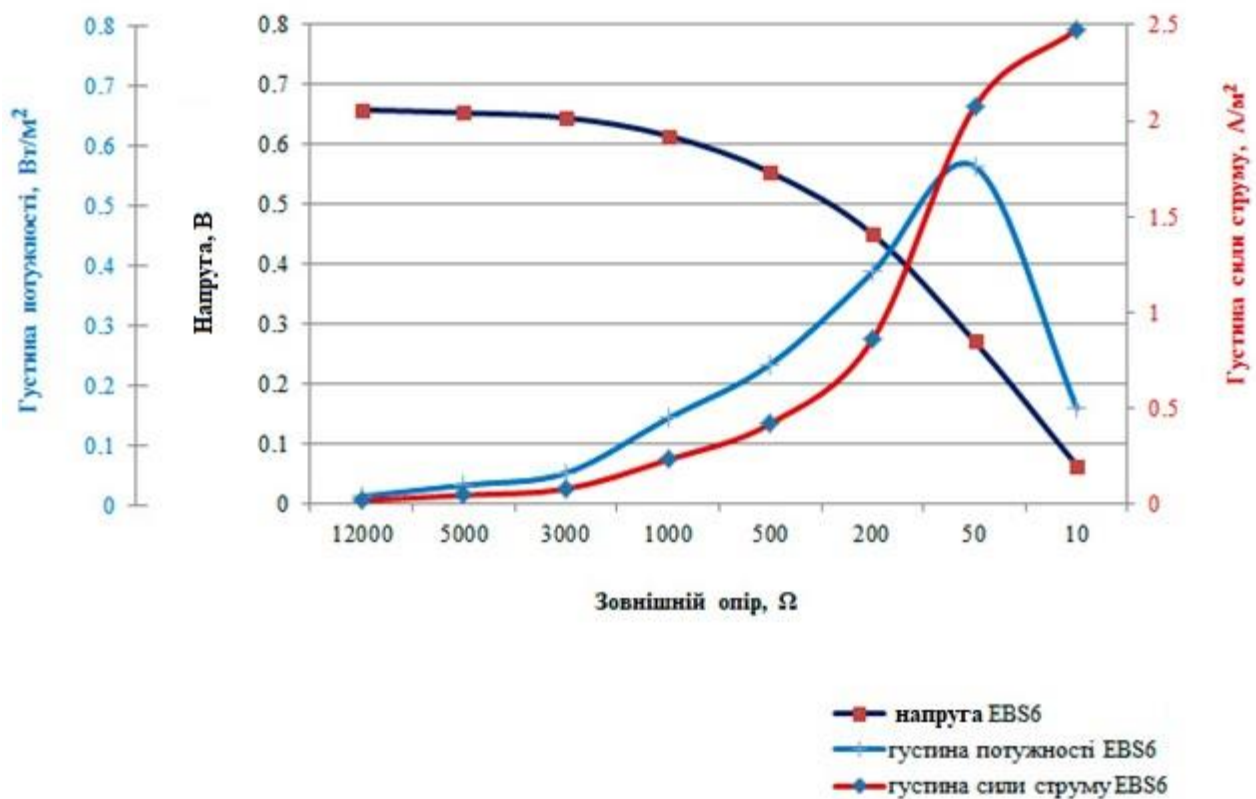


Рис. 8.3.1 Вплив короткотривалої дії зовнішнього опору на напругу, густина потужності та густина сили струму біосистеми 6 з мохами, нормалізовані до 1 м² поверхні, охопленої рослинами та електродами на протязі осіннього періоду ($x \pm SE$, $n=10$). Максимальне значення напруги біосистеми 6 спостерігали при 12 000 Ω

Через кілька днів після проведених поляризаційних вимірювань було проаналізовано рівень напруги електро-біосистеми 6 під дією тривалого кількатижневого навантаження зовнішніх опорів 1, 3 та 5 к Ω (рис. 8.3.2). В перші доби після застосування опору 1 к Ω значення біоелектричного потенціалу знизилися, проте, в наступні дні на фоні підключення опорів вищих значень 3 к Ω та 5 к Ω відбувалося зростання напруги (рис. 8.3.2). Подібно, як було зафіксовано

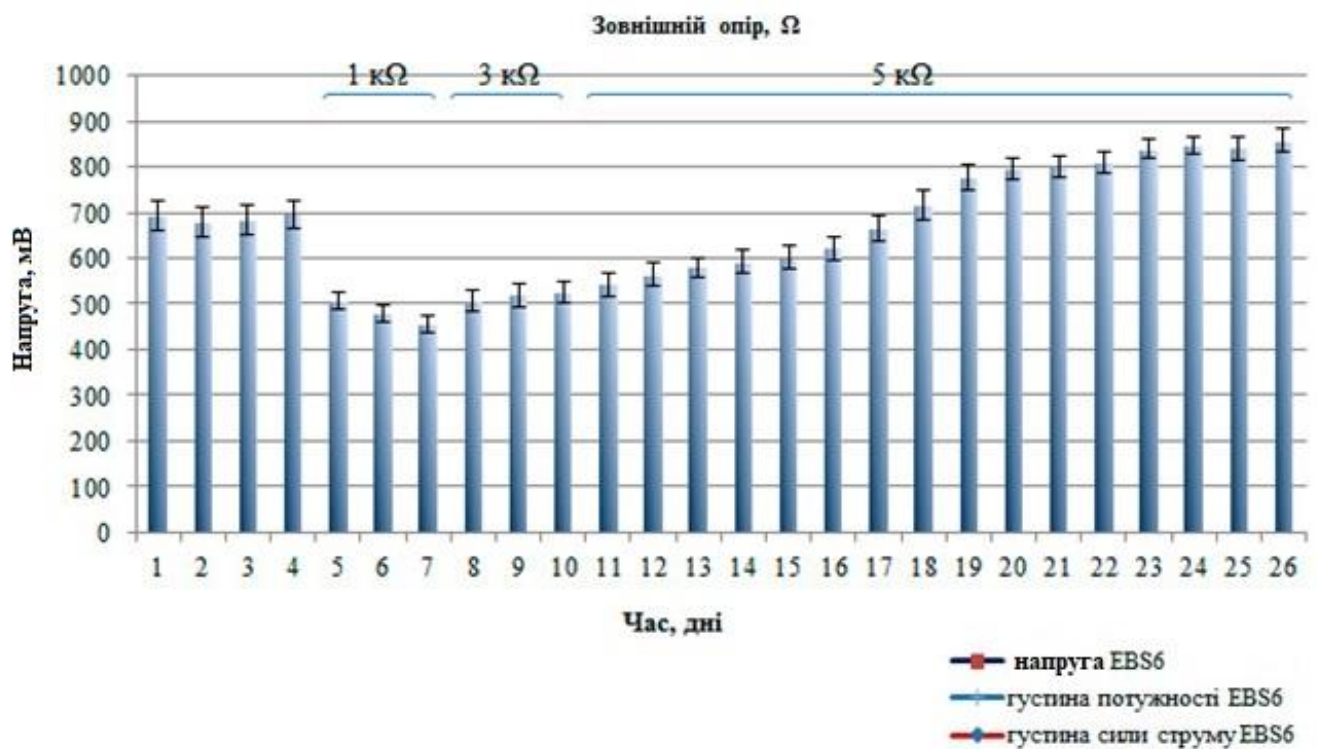


Рис. 8.3.2 Вплив довготривалої дії зовнішніх опорів на генерацію напруги біосистемою 6 під час осіннього періоду на даху будинку ($x \pm SE$, $n=10$).

Протягом 5 – 7 днів було підключено 1 к Ω , протягом 8 – 10 днів – 3 к Ω , протягом 11 – 26 днів – 5 к Ω .

ріст рівня біоелектрики з ростом навантаження зовнішніх резисторів в роботі (Wetser et al., 2017). Низькі вихідні значення біоелектричного потенціалу електро-біосистеми 6 обумовлені, очевидно, двома факторами, перенавантаженням електро-біосистеми після проведення серії поляризаційних вимірювань з

високими опорами та накладанням несприятливих метеумов. Кілька діб тривало відновлення роботи електро-біосистеми 6. За 10 днів при підключенні опору 5 к Ω електро-біосистема вийшла на рівень вихідних значень, що були без застосування опорів, а в подальшому, значення напруги навіть зростали (рис. 8.3.2).

Вартість біосистем для монтування в екстенсивний контейнерний дах складає 24.3 – 32.2 EUR/м² в залежності від типу використовуваних катодів (монолітна плита чи графітові палички). Здешевлює біотехнологію можливість використання в якості катодів графітових відходів тролейбусного транспорту, що використовує графітові струмоприймачі для тролейбусних щіток. Розроблена модель електро-біосистем має перспективи використання для низькоенергоспоживаючих приладів таких як LED освітлення, живлення польових метеодатчиків, ультразвукових відлякувачів комарів, кротів та є базовою для подальшого вдосконалення в плані максималізації отримуваної біоелектрики.

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександрю Медведєву за консультації і студентам-екологам Богдану Валько та Назару Стемпицькому за технічну допомогу в експериментах та конструюванні систем збору біоелектрики.

Висновки до розділу 8

Показана можливість та перспективність використання мохів як біокомпонента електро-біосистем на дахах в універсальних ґрунтових субстратах з розробленими нами електродними системами. Температура повітря та кількість опадів сукупно мають суттєвий вплив на функціонування електро-біосистем на дахах та генерацію ними біоелектрики. Електро-біосистеми з мохами функціонували на повну потужність при температурі вище +10°C та відсутності тривалих посух. Вплив на генерацію біоелектрики тривалих опадів: протягом кількох днів поспіль і навіть більше тижня був сприятливим за оптимальних

температур. Виявлено критичність температури нище $+10^{\circ}\text{C}$, яка часто виступала лімітуючим фактором у роботі електро-біосистем: сприятлива кількість опадів з одночасно температурою нище $+10^{\circ}\text{C}$ супроводжувалися зниженням напруги та сили струму. Виявлений пригнічуючий лімітуючий вплив морозів та тривалих посух на генерацію біоелектрики електро-біосистемами з мохами, період відновлення електропродуктивності був тривалим. В цих умовах електро-біосистеми працювали нестабільно з різкими падіннями біоелектричних показників та частково відновлювали свою роботу під час періодів відлиг та плюсових температур взимку в різній мірі в залежності від метеоумов.

Конфігурація електродних систем має значення для ефективності їх роботи. Біосистеми, де конфігурація електродів забезпечувала в 1.65 рази більшу площу контакту з субстратом, дозволяли отримувати вищі в 1.22 рази значення біоелектрики. Проте технологічно їх контакти між електродами є більш вразливими до пошкодження силою розширення замерзлої води та вони в більшій мірі виходили з ладу після зимового періоду. Конфігурація б виявилася найбільш ефективною та водночас стабільною до ушкоджень під впливом метеофакторів.

Функціонуючі на вихідному рівні після зимівлі електро-біосистеми б, що характеризуються високими показниками біоелектрики, в тому числі при навантаженні 5 к Ω , відкривають перспективи використання електро-біосистем з морозостійкими мохами на дахах будівель в кліматичній зоні східноєвропейського міста Львова після оптимізації в таких напрямках: як термоізоляції контейнерів чи вирощуванні у ґрунті у складі інтенсивних зелених дахів, використання тепла відпрацьованого повітря систем опалення і забезпечення регулярного зволоження.

Матеріали розділу опубліковані в публікаціях:

Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2020). Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76 (1), 20 – 31. doi: 10.5755/j01.ere.m.76.1.22212 **Scopus Q4** та міжнародний журнал, **Lithuania**

Література до розділу 8

- Alexandri, E. & Jones, P. (2006). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building & Environment*, 48 (4), 480–493. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.10.055
- Atherton, I., Bosanquet, S., & Lawley, M. (2010). Mosses and Liverworts of Britain and Ireland: a field guide. British Bryological Society, Plymouth.
- Bombelli, P., Dennis, R. J., Felder, F., Cooper, M. B., Iyer, D. M. R., Royles, J., Harrison, S. T, Smith, A. G, Harrison, C. J., & Howe, C. J. (2016). Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society Open Science*, 3 (10), 160249. doi: 10.1098/rsos.160249
- Buck, W. R. & Goffinet, B. (2000). Morphology and classification of mosses, 71–123. In Shaw, A. J. & Goffinet, B., Eds., *Bryophyte Biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42, 1582–1591. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004
- Clark, C., Talbot, B., Bulkley, J., & Adriaens, P. (2005). Optimization of green roofs for air pollution mitigation, 482–597. In: *Proceeding of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities*, Washington, DC, 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.
- Chino, M. (2010). Copenhagen Adopts a Mandatory Green Roof Policy. From <https://inhabitat.com/copenhagen-adopts-a-mandatory-green-roof-policy/>
- Chow, A.T. (2006). Disinfection by product reactivity of aquatic humic substances derived from soils. *Water Research*, 40, 1426–1430. doi: 10.1016/j.watres.2006.01.008
- Chow, A. T., Dai, J., Conner, W. H., Hitchcock, D. R., & Wang, J.-J. (2013). Dissolved organic matter and nutrient dynamics of a coastal freshwater forested wetland in

- Winyah Bay, South Carolina. *Biogeochemistry*, 112, 571–587. doi: 10.1007/s10533-012-9750-z
- Cooper, J. P. (1975). *Photosynthesis and Productivity in Different Environments*. International Biological Programme 3. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Dai, J., Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- De Schamphelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Hofte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- Dimitrijevic D., Zivcovic, P., Brancovic, J., Dobrnjac, M., & Stefanovic, Z. (2018). Air pollution removal and control by green living roof systems. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 11, 47–50.
- Fotouchi, F. (2015). The role of green roofs in sustainable development. *Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal*, 36 (4), 414–420.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41, 1276–1286. doi: 10.21273/HORTSCI.41.5.1276
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124
- Helder, M., Chen, W. S., Van Der Harst, E. J. M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Buisman, C. J. N., & Potting, J. (2013a). Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 7, 52–64. doi: 10.1002/bbb.1373
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013b). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells

- during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51, 1–7. doi:10.1016/j.biombioe.2012.10.011
- Hong, S. W., Chang, I. S., Choi, Y. S., & Chung, T. H. (2009). Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 100, 3029–3035. doi: 10.1016/j.biortech.2009.01.030
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Kohler, M. (2005). The green roof movement – from a botanical idea to a new sustainable style in modern architecture, 168–176. In: Proceedings of 1th international landscape education symposium. Shanghai, China.
- Konasova, S. (2014). The role of green roofs in sustainable construction, 470–478. In Proceedings of Creative Construction Conference, 21–24 June 2014. Elsevier Procedia, Prague, Czech Republic.
- Konyuhov, V. Yu., Gladkih, A. M., Galyautdinov, I. I., & Kiseleva, T. Yu. (2019). Ecological architecture: the green roofs. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 350, 012035. doi: 10.1088/1755-1315/350/1/012035
- Kuronuma, T., Watanabe, H., Ishihara, T., Kou, D., Touda, K., Ando, M., & Shindo, S. (2018). CO₂ Payoff of Extensive Green Roofs with Different. Vegetation Species Sustainability, 10, 2256, 1–12. doi: 10.3390/su10072256
- Li, L. H., Sun, Y. M., Yuan, Z. H., Kong, X. Y. & Li, Y. (2013). Effect of temperature change on power generation of microbial fuel cell. *Environmental Technology*, 34 (13-16), 1929–1934. doi: 10.1080/09593330.2013.828101
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, 172010, 1–10. doi:10.1155/2013/172010
- Lubell, J. D., Barker, K. J., & Elliott, G. C. (2013). Comparison of Organic and Synthetic Fertilizers for Sedum Green Roof Maintenance. *Journal of Environmental Horticulture*, 31(4), 227–233.

- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *195*, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098
- Mentens, D. R., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, *77*, 217–226. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.010
- Monterusso, M. A., Rowe, D. B., & Rugh, C. L. (2005). Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *HortScience*, *40*, 391–396.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Brass, B., Coffmann, R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience*, *57*(10), 823–833. doi:10.1641/B571005
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, *186*, 270–275. doi:10.1016/j.biortech.2015.03.014
- Rowe, B., Monterusso, M., & Rugh, C. (2005). Evaluation of *Sedum* species and Michigan native taxa for green roof applications, 469–481. In: Proceeding of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC, 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymannia bioelektryky iz konteineru z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodov [The method for bioelectricity obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, *32*(9), 870–876. doi:10.1002/er.1397

- Studlar, S. M. & Peck, J. E. (2009). Extensive Green Roofs and Mosses: Reflections from a Pilot Study in Terra Alta, West Virginia. *Evansia* 26 (2), 52–63. doi: 10.1639/0747-9859-26.2.52
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2017). Evaluation of Sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 108 (A), 203–210. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.08.017
- Theodosiou, T. G. (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy & Buildings*, 35, 909–917. doi: 10.1016/S0378-7788(03)00023-9
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 94(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, 47, 126–131. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.06.029
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, 83, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, 185, 642–649. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42 (31), 7266–7273. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.003

Розділ 9. Біотехнологічні системи, базовані на *Carex hirta* на зелених дахах енергоефективних будинків

Отримані нами результати перспективності мохів у складі біосистем для генерації біоелектрики на дахах зумовило наш інтерес до подальших розробок електро-біосистем, які будуть більш стійкими до впливу метеофакторів на дахах. Використання зеленів дахів відоме ще з минулих століть та в наш час набуває все більшої популярності через їх очевидні екологічні переваги та серйозний вклад у запобігання глобального потепління на планеті. В теплу пору, зелені дахи здатні істотно понизити середню температуру цілого міста, поглинаючи тепло та зменшуючи ефект міських осередків спеки (Banting et al., 2005; Getter and Rowe, 2006). В холодний період зелені дахи сприяють скороченню тепловтрат і витрат на обігрів будівель. Разом з тим вони зменшують, асоційовані з емісією парникового CO₂, енерговитрати на кондиціонування та опалення будинків (Oberndorfer et al., 2007; Castleton et al., 2010). Зелені дахи відіграють важливу роль в попередженні затоплень міст, які стали частим явищем в умовах глобальної зміни клімату. Якщо у лісах поглинається близько 95% опадів, то, у містах, вкритих бруківкою, асфальтом, бетоном поглинається лише близько 25% дощової води (Scholz-Barth, 2001), що під час сильних злив непропорційно переповнює комунальні каналізаційні системи, спричиняючи затоплення (Konasova, 2014). Покращення якості повітря міста (Yang et al., 2008), благоустрій територій та створення відпочинкової зони є додатковими перевагами зелених дахів.

Проте з часу облаштування контейнерів з травами та електродами на дахах будівлі Ваненгінського університету вони набули перспективи ще одного вагомого екологічного значення – джерела екологічно чистої відновлювальної енергії (Helder, 2012^a). Як показують теоретичні розрахунки (Strik et al., 2011) за умови вдосконалення технології, зелений дах зможе забезпечити енергією цілий будинок. В 2014 році в Амстердамі засвітили сотні придорожніх світлодіодних лампочок, використовуючи лише електрику, добуту з рослинно-мікробних

угруповань довколишнього ґрунту (Schultz, 2014). У 2016 році розробили бездротовий датчик, здатний моніторити дані про навколишнє середовище, використовуючи активність ґрунтових бактерій у поєднанні з рослинами для розумного сільського господарства (Brunelli et al., 2016). Хоч поки що рослинно-мікробна енергетика здатна забезпечити лише низькоємні енергетичні потреби, прогрес в її розвитку є очевидним та дає підстави сподіватися на швидкі перспективи реального втілення біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики.

Дослідження продукції біоелектричної енергії з ґрунту зелених насаджень як різновиду альтернативної енергетики, швидко розвивається протягом останнього десятиліття (Rahimnejad et al., 2015; Behera & Varma, 2016). Оскільки теоретично розрахований максимум потужності енергії біотехнології поки що недосягнутий роботи вчених спрямовані в напрямку вдосконалення технології: підбираються нові електродні системи (Harnisch et al., 2009; Picot et al., 2011; Kalathil et al., 2017) та їх конфігурації (Chen et al., 2012; Helder et al., 2012^b; Wetser et al., 2017), нові середовища (Timmers et al., 2010; Helder et al., 2011) та рослини (Lu et al., 2015; Moqsud et al., 2015; Nitisoravut et al., 2017).

В контексті вище вказаного, ми поставили за мету розробити біосистему для дахів на основі осоки. Вивчення можливості застосування осоки як рослинного компонента у складі біоелектричних систем отримання біоелектрики із ґрунту зелених насаджень зумовлено її невибагливістю та здатністю рости у всіх кліматичних зонах земної кулі (Gubanov et al., 2002; Jermy et al., 2007). Такі властивості осок як здатність очищувати ґрунт і водойми (Wang et al., 2018), в тому числі від нафтозабруднень (Dzura et al., 2008; Rusyn et al., 2009) та використання їх в ландшафтному дизайні (Alekseev, 1971; Egorova, 1999; Gubanov et al., 2002) додають цінності осокам як біокомпонентів біоелектричних систем в додаток до їх космополітичності та стійкості в різноманітних зовнішніх умовах. Придатність осоки у біоелектричних системах дахів може відкрити можливість облаштування на дахах будівель чи біля будинків зелених зон багатократного екологічного призначення: не лише озеленення та благоустрою і кліматорегуляції,

але і отримання біоелектрики та активного очищення ґрунтового середовища від поллютантів.

В біотехнологіях рослинно-мікробних паливних елементів описано використання рослин, що надають перевагу вологим місцезростанням: рису посівного *Oryza sativa* (De Schamphelaire et al; 2008 Kaku et al 2008), тростянки аномальної *Arundinella anomala* і тростника гігантського *Arundo donax* (Helder et al 2010), тростника південного *Phragmites australis* (Wetser et al 2015), спартини англійської *Spartina anglica* (Timmers et al 2010; Helder et al 2010; Wetser et al 2015), лепешняка великого *Glyceria maxima* (Timmers et al 2012), іпомеї водної *Ipomea aquatica* (Liu et al 2013), ряски *Lemna minuta* (Hubenova and Mitov, 2012), *Canna indica* (Yadav et al., 2012; Lu et al., 2015), рогозу широколистого *Typha latifolia* (Oon et al., 2015). Більшість осок, як і перелічені досліджувані рослини теж надають перевагу вологим місцезростанням. Проте осока шершаволиста *Carex hirta* здатна рости на освітлених ділянках з різною вологістю, як на вологих, так і на сухих, на різних субстратах: піщаних і глинистих, тому є оптимальним кандидатом для використання у електро-біосистемах на зелених дахах без інтенсивних систем поливу у ґрунтових субстратах. В цій роботі ми поставили перед собою завдання випробувати функціонування модельних біоелектричних систем з осокою *C. hirta* із розробленими нами системами електродів графітово-цинковано-стальними із елементами нержавіючої сталі (Rusyn & Medvediev, 2018) різних конфігурацій протягом року на зелених дахах в кліматичних умовах заходу України, дослідити вплив температури та атмосферних опадів на продукування біоелектрики, порівняти генерацію біоелектрики та бюджет біосистем на основі різних рослин.

9.1 Вплив температури та атмосферних опадів на продукування біоелектрики біосистемами з *C. hirta*

Метеоумови, особливо температура та інтенсивність опадів мають вплив на електропродуктивність біосистем на дахах. Електро-біосистеми чутливо реагують на посушливі періоди та інтенсивні опади, підйоми та падіння температури

довкілля. Після інсталяції електро-біосистеми у вересні при середньотижневій температурі 15.38°C та середньотижневій кількості опадів 4.19 мм/день сила струму встановилась на середньотижневому рівні 19.25 ± 0.73 мА (рис. 9.1.1). З наступним зниженням кількості опадів вкінці вересня та початку жовтня сила струму знижується. Найбільш виразні підйоми середньодобових значень біоелектричного потенціалу та сили струму є після інтенсивних опадів на фоні сприятливих плюсових температур, що настають після тривалих засушливих періодів. Так, наприклад, в кінці жовтня після 22-ти денного посушливого періоду, під час наступних 10-ти днів опадів, коли сумарна кількість опадів, що випали, становила 92.7 мм, спостерігається підйом значень біоелектрики електро-біосистем, сила струму зростає в 2.16 раз (рис. 9.1.2). Подальший ріст значень сили струму із збільшенням кількості опадів припиняють заморозки і сила струму знижується (рис. 9.1.2)

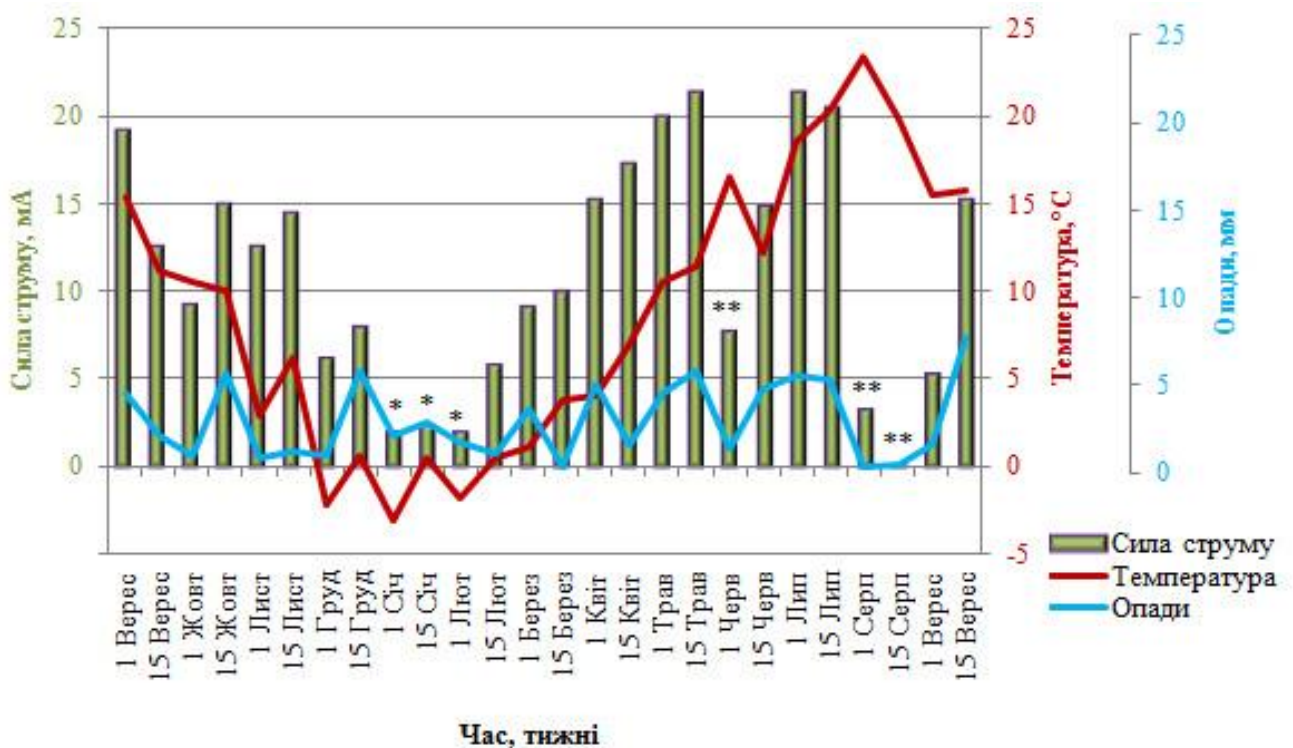


Рис. 9.1.1 Динаміка сили струму біосистем з *S. hirta* в залежності від впливу метеофакторів протягом року на дахах будинків ($x \pm SE, n=20$).

*Сила струму суттєво опускається під час мінусових температур та

**тривалих посушливих періодів на фоні оптимальних температур ($P < 0.05$)

В пізньоосінній та зимовий період лімітуючим фактором генерації біоелектрики виступають низькі температури (рис. 9.1.1). В цей період знижується як рівень біоелектричного потенціалу, так і сили струму. Під час заморозків протягом зимового періоду сила струму не перевищує 3 мА ($P < 0.05$). (рис. 9.1.1). Із підвищенням температури доквілля ранньою весною, сила струму знову зростає, а при температурі вище 10°C зростає до вихідних значень (рис. 9.1.1). Середньотижнева сила струму у першу половину травня піднімається вище 20 мА при середньодобовій температурі 11.43°C. Далі сила струму утримується на високому рівні та опускається під час посух.



Рис. 9.1.2 Середні біоелектричні параметри: напруга та сила струму біосистем з *C. hirta* за різних умов вологості ґрунту: під час інтенсивних опадів та посушливих періодів осінню ($\bar{x} \pm SE$, $n=20$).

Зниження сили струму та напруги зафіксовано на початку жовтня під час кілька тижневого посушливого періоду та наприкінці жовтня із зниженням одночасно середньодобової температури нижче 0°C та кількості опадів.

Вплив кількості опадів на рівень біоелектрики є найбільш значним у весняний, літній та осінній період, коли рослини розвинуті, а середньодобові температури не опускаються нижче 0°C. Тривалі посушливі періоди на фоні оптимальних плюсових температур у червні та серпні, приводять до різкого зниження сили струму ($P < 0.05$) (рис. 9.1.1).

Так, середньотижнева сила струму, яка становила 21.36 ± 0.52 мА у останні два тижні травня за сприятливих температур, 11.43°C, та достатньої кількості опадів, 5.39 мм/день, в наступні посушливі два тижні червня із зниженою кількістю опадів, 1 мм опадів/день, незважаючи на сприятливі температури, 16.55°C, опустилася до 7.78 мА (рис. 9.1.1). Протягом липня, за оптимальних температур та сприятливого рівні зволоженості, при середньодобовій температурі 18.51°C – 20.32°C та кількості опадів 4.95 – 5.22 мм/день середньотижнева сила струму піднімається до 20.48 – 21.35 мА. Протягом серпня, за аналогічних сприятливих температур, але низькому рівні зволоження, при середньодобовій температурі 19.87 – 23.34°C та кількості опадів 0.00 – 0.13 мм/день, сила струму опускається практично до нуля, до 0.11 – 3.23 мА (рис. 9.1.1). Проте, у вересні сила струму знову відновила свій рівень при зростанні кількості атмосферних опадів, 4.65 мм/день при температурі 11.08°C (рис. 3).

Метаболізм рослин активізується в зоні комфорту плюсових температури та достатнього зволоження, активний фотосинтез супроводжується корневими виділеннями – субстратами для розвитку електро-генеруючих мікроорганізмів, очевидно, тому в цих умовах зростають показники сили струму. Несприятливими факторами для роботи електро-біосистем є тривале утримання мінусових температур повітря та тривалі посухи. Сила струму знижується на 91.52 % від максимальних значень під час заморозків та практично до нуля під час тривалих посух, і повністю відновлює свій рівень при підйомі температури та відновленні опадів. Оптимальними для функціонування електро-біосистем є регулярні опади з кількістю опадів близько 5.1 мм/день та плюсова температура. Темоізолювавши контейнери та забезпечивши регулярний полив рослин можна досягнути ефективної роботи електро-біосистем цілорічно за винятком періоду тривалих

зимових заморозків. Вирощування рослин у ґрунті в складі екстенсивного чи інтенсивного зеленого даху та використання теплоти відпрацьованих газів систем опалення є ще одною можливістю забезпечення цілорічної ефективної роботи без сезонних втрат енергії..

Осока шершаволиста є зимостійким рослинним компонентом електро-біосистем та пережила вплив суворих зимових метеоумов на дахах. Проте в процесі експерименту значна частка електро-біосистем зазнавала пошкоджень внаслідок дії замерзлої води на з'єднання електродних систем і значення напруги дещо опускалися (табл. 9.1). В зимовий період електропродуктивність біосистем знижувалася і вихідний рівень весною відновлювався повністю в 9.75 – 65.63% біосистем в залежності від конфігурації, в решти біосистем рівень генерації біоелектрики був дещо зниженим (табл. 9.1). Виходили з ладу після зимового періоду та потребували відновлення з'єднань між електродами в основному електро-біосистеми 1 та 2. Взимку сила розширення замерзлої води пошкоджувала в них контакти між електродами. Електро-біосистема 3 із посиленими з'єднаннями виявилася стійкою до пошкоджуючої дії метеофакторів (табл. 9.1). Електро-біосистеми із заміненними весною електродними системами та із збереженням рослинного покриву продовжують ефективно працювати (табл. 9.1).

Таблиця 9.1 Ефективність роботи біосистем різних типів конфігурацій електродних систем протягом року

Тип електро-біосистем	EBS ефективно працюючі цілорічно, %	Середній біоелектричний потенціал, мВ			
		Вересень 2014	Квітень 2015		
			ЕBS без ушкоджень	ЕBS з поломками	ЕBS після відновлення
EBS1	9.75±0.43	1031.11±34.6	1018.46±44.7	717.05±25.2	1076.99±35.5
EBS2	11.31±0.55	1026.23±45.9	1042.87±38.1	850.14±29.5	1085.54±42.3
EBS3	65.63±1.01	1049.05±38.2	1056.13±40.2	894.27±37.4	1071.12±41.7

9.2 Роль конфігурацій систем електродів в роботі біосистем з *C. hirta*

Довготривала дія зовнішнього опору 500 Ω викликала зниження напруги, більше як удвічі, в 2.21 – 2.26 раз, що відновлювався протягом доби після зняття зовнішнього резистора у всіх біосистемах незалежно від типів конфігурації (рис. 9.2.1). Падіння напруги в біосистемі 3 було в дещо меншій мірі, в порівнянні з біосистемами 1 та 2 ($P > 0.05$) (рис. 9.2.1).

В умовах короткотривалого навантаження густина потужності в електробіосистемах без додаткових кріпильних елементів на катодах опускалася з 0.95 (біосистема 3) до 0.79 W/m^2 (біосистема 1) (рис. 9.2.2). Найвища густина потужності енергії була зафіксована при короткотривалому застосуванні зовнішнього резистора 50 Ω .

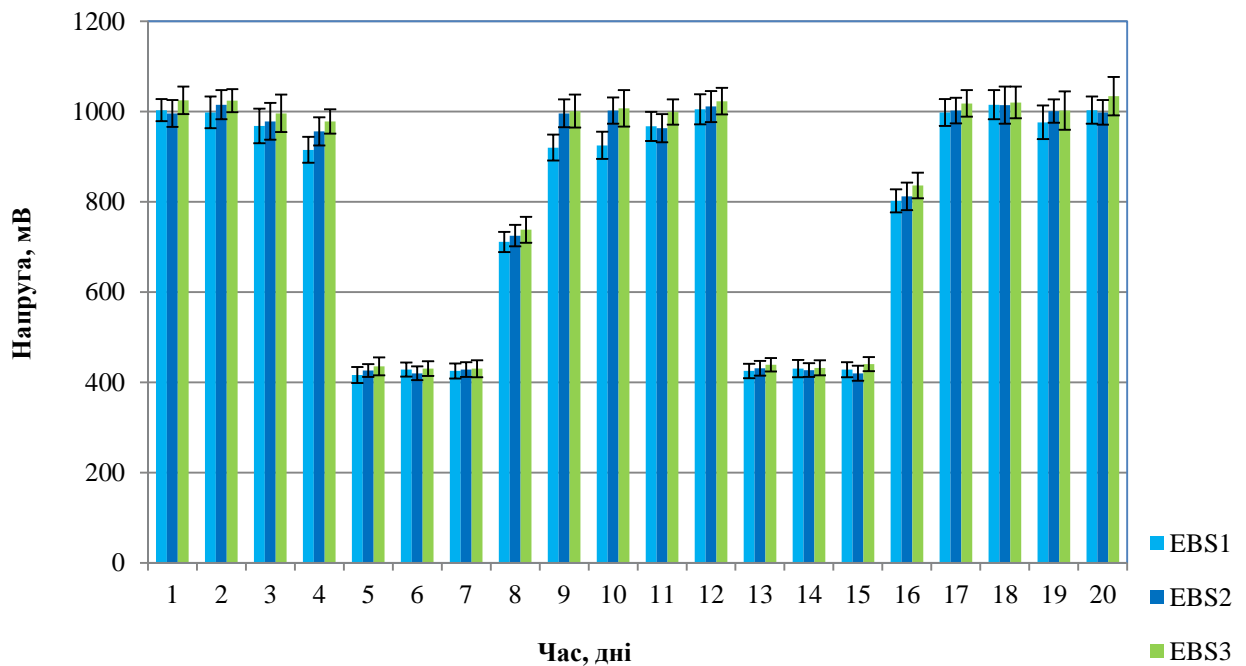


Рис. 9.2.1 Вплив зовнішнього опору 500 Ω на роботу біосистем з *C. hirta* з різними конфігураціями електродних систем (EBS 1–3) протягом 5, 6, 7-ої та 13, 14, 15-ої діб ($\bar{x} \pm SE$, $n=20$).

При застосуванні опору напруга знижувалася та відновлювався на протязі доби після його зняття

Найвищі значення напруги були зафіксовані при застосуванні високих зовнішніх опорів та знижувалися з підключенням нижчих. Так, при короткотривалому підключенні зовнішнього резистора 12 к Ω середній біоелектричний потенціал біосистем становив від 970.3 мВ (біосистема 3) до 952.1 мВ (біосистема 1) та знижувався в середньому до 107.4 мВ (біосистема 3) – 98.2 мВ (біосистема 1) при застосуванні зовнішнього опору 10 Ω (рис. 9.2.2). Густина сили струму, нормалізована до 1 м² поверхні, охопленої рослинами та електродами, становила 0.960 А/м² (біосистема 1) – 1.044 А/м² (біосистема 3) при короткотривалому застосуванні зовнішнього опору 200 Ω (рис. 9.2.2).

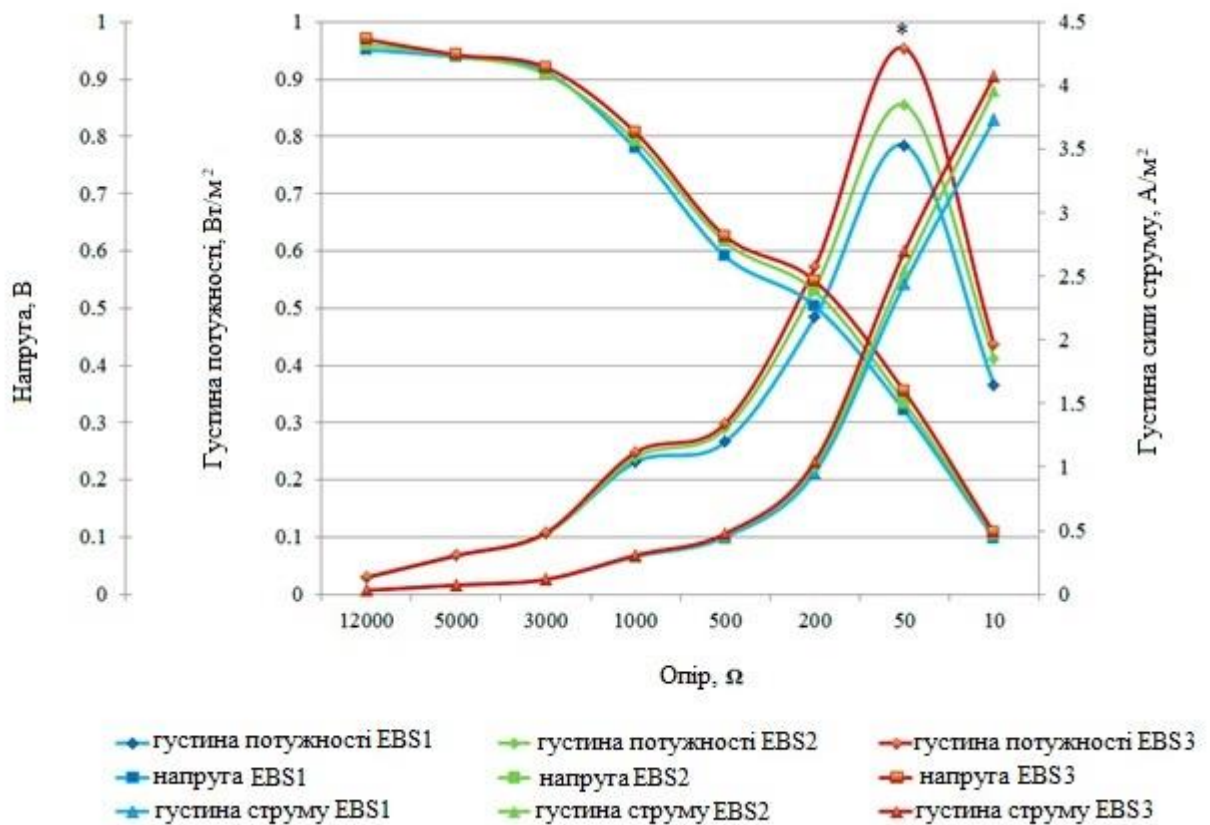


Рис. 9.2.2 Вплив короткотривалої дії зовнішніх опорів на біоелектричні параметри біосистем з *C. hirta*, нормалізовані до 1 м² поверхні, охопленої рослинами та електродами на протязі осіннього періоду ($\bar{x} \pm SE$, n=10).

*Густина потужності біосистем 3 при застосуванні опору 50 Ω суттєво відрізняється в порівнянні з біосистемою 1 ($P < 0.05$) та перевищує потужність біосистеми 2 ($p > 0.923$)

Генерація біоелектрики в умовах коротко- та довготривалого навантаження була дещо вищою в біосистем 3 (рис. 9.2.1, 9.2.2). При застосуванні опору 50 Ω густина потужності біосистем 3 суттєво відрізнялася від біосистем 1 ($P < 0.05$) та перевищувала гуштину потужності біосистем 2 ($p > 0.923$). Біосистеми 3 були також більш стійкими до пошкоджень несприятливими метеофакторами зимового періоду і працювали в більшій мірі ефективно круглорічно: 65.63 % електробіосистем з конфігурацією 3 після зимового періоду відновили вихідні значення біоелектричного потенціалу та сили струму (табл. 9.1).

9.3 Особливості генерації біоелектрики біотехнологічними системами з *C. hirta* на дахах на протязі року

Розроблені на теперішній момент біосистеми для отримання рослинно-мікробної біоелектрики містять електродні системи на основі різних матеріалів, для прикладу, платино-залізо(II)-фталоціанід-базовані електроди (Harnisch et al., 2009), проте більш широко використовуваними матеріалами є вуглецеві і графенові (Helder et al., 2010; Sarma & Mohanty, 2018; Chen et al., 2019). Вибір матеріалів, оптимальної конфігурації електродів і придатних рослин може підвищувати продуктивність рослинно-мікробних електробіосистем (Nitisoravut et al., 2017). Новизна розробленої нами електробіосистеми полягає в застосуванні нових матеріалів для електродних систем, графітово/оцинковано-стальних з нержавіючою сталлю, їх нових конфігурацій та нового біокомпоненту, рослини осоки шершаволистої *C. hirta*. Дана біосистема володіє деякими подібними характеристиками до описаних в літературі з іншими типами електробіосистем. В умовах короткотривалого підключення резисторів відмічається наступна залежність: зниження значення біоелектричного потенціалу із зниженням опору, подібно, як описано в електробіосистемах Cheng et al. (2006). Густина сили струму становить 1.02 A/m^2 при короткотривалому застосуванні зовнішнього опору 200 Ω (рис. 9.2.2), що є близьким до зафіксованих у інших біоелектричних системах з відмінними електродними системами та середовищами 1.60 A/m^2 в

синтетичному середовищі (Helder et al. 2012) та у водному середовищі 1.62 A/m^2 (Hubenova & Mitov, 2012). Максимальні показники сили струму є нижчими, ніж зафіксованими в електро-біосистемі з *A. plantago-aquatica* в болотистому середовищі, ймовірно, через використання електродних систем з меншою кількістю електродів, та середовища з меншою провідністю. Вплив середовища на електропродуктивність є дуже вагомим, оскільки його структура, рН визначає тип мікробної спільноти, яка генерує біоелектрику (Nitisoravut et al., 2017).

Розташування електродів у субстраті з коренями рослин та ґрунтовими мікроорганізмами має значний вплив на вихідну потужність електро-біосистеми (Nitisoravut et al., 2017). Так, з використанням плоского пластинного дизайну електро-біосистем замість тубулярного дизайну, струм збільшується в 10 разів і щільність потужності в 2 рази на площу посадки (від 0.15 A/m^2 до 1.60 A/m^2 і від 0.22 Вт/м^2 до 0.44 Вт/м^2) (Helder et al., 2012b). Істотне значення має глибина розташування електродів. Було показано, що розміщення анодів на глибині більше 5 см приводить до більш ефективного отримання біоелектрики, в порівнянні з поверхневим розміщенням аноду на глибині 2 см (Takanezawa et al., 2010; Deng et al., 2014).

Ми використали варіацію плоскої пластинної конфігурації з різними типами розміщення систем електродів в контейнерах: з вертикальним і горизонтальним розміщенням анодів і катодів у субстраті на глибині від 2 см до 12 см та катодів різного вигляду: катодних графітових палочок, розміщених поокремості (біосистема 1) та з'єднаних у вигляді цілісної плити (біосистема 2), а також з посиленням їх кріпленням та із збереженням більшої в 1.65 раз площі контакту з субстратом (біосистема 3). Серед усіх варіантів конфігурацій, найбільший вплив на електропродуктивність біосистем мало посилене кріплення з провідником та більша площа контакту із субстратом. Електро-біосистема 3 характеризувалася вищими значеннями біоелектрики в умовах як короткотривалого, так і довготривалого навантаження (рис. 9.2.1, 9.2.2). Ймовірно, позитивну роль відігравав більш міцний контакт електродів з провідниками за допомогою додаткового кріпильного елемента з нержавіючої сталі та більша активна

електродна площа, що дозволяло більш ефективно збирати емітовані в ґрунт електрони, уникаючи втрат. А також, біосистема 3 була також більш стійкою до пошкоджень несприятливими метеофакторами взимку (табл. 9.1).

Хоч частка електро-біосистем, що ефективно працюють цілорічно не є 100 відсотковою, проте той факт, що рослини витримують заморозки і відновлюють свій ріст весною, є вагомим досягненням. В літературі описано загибель та вимерзання рослин на зелених дахах протягом зимового періоду (Helder et al., 2013). Було показано, що осока шершаволиста є морозостійкою рослиною і електро-біосистеми з нею можна експлуатувати цілорічно на дахах в кліматичних умовах західноукраїнського регіону.

У вищеописаних дослідженнях було показано, що робота електро-біосистем залежить від температури довкілля. Зниження температури нижче 10°C супроводжується суттєвим зниженням рівня струму. Очевидно, знижений в цих умовах рівень фотосинтезу та зниження метаболізму мікроорганізмів при низьких температурах приводить до ослаблення коренево-ґрунтового потоку органічних речовин, який впливає на розвиток електрико-продукуючих мікроорганізмів ґрунту. Схожі результати пригнічення електропродуктивності систем при температурах нижче 10°C показали Hong et al. (2009) і Li et al. (2013), випробовуючи в лабораторних умовах електро-біосистеми, але з відмінними електродними системами.

За оптимальних плюсових температур лімітуючим фактором для роботи електро-біосистем виступає кількість опадів. Тривалі посушливі періоди приводять до різкого зниження сили струму. Подібна картина описана в роботі групи дослідників Dai et al. (2015), які показали вплив сезонних посушливих період на падіння сили струму електро-біосистем *in situ*. Регулярний полив протягом засушливих періодів може забезпечити ефективну роботу електро-біосистем цілорічно, за винятком періоду тривалих зимових заморозків.

Електро-біосистема на основі осоки *S. hirta* характеризувалися вищою резистентністю до метеофакторів та була ефективнішою в 1.7 разів від системи на

основі мохів на зелених дахах при температурі вище 0°C та кількості опадів 5 мм/день.

9.4 Порівняння генерації біоелектрики та бюджету біосистем

Було проаналізовано шість різних типів біосистем на основі космополітних багаторічних рослин, яким характерна стійкість до екстремальних умов довкілля, таких як судинні/васкулярні: 1) водяний подорожник *A. plantago-aquatica* та 2) калюжниця болотяна *C. palustris*, що заселяють вологі ґрунти; трави мезофіти 3) костриця очеретяна *F. arundinacea* та 4) осока шорстковолосиста *C.hirta*, а також 5) однорічна рослина базилік кімнатний *O. basilicum*, що має застосування як пряна рослина і несудинна/неваскулярна рослина 6) мох зозулин льон *P. commune*. Останній представляє собою унікальний вид моху, яким як відомо нехарактерні водопровідні тканини та високі розміри стебел. Проте особливістю виду *P. commune* є 1) чітка диференціація водопровідної тканини та формування гадрому і лептому, що аналогічні ксилемі і флоемі у вищих рослин, а також 2) виняткова висота стебел рослини.

Незважаючи на однакові середні параметри висоти наземної частини, що складала 0.34 ± 0.01 м, рослини характеризувалися різною листяно-стебловою масою, залежною від кількості листків та мінімальної густини розростання рослин на одиницю площі кожного виду рослин, яка становила від 382 ± 10 г м⁻² в *O. basilicum* до 612 ± 17 г м⁻² в *C.hirta*. І, навпаки, мохи з нижчим ростом завдяки високій густині листя та проростання характеризувалися листяно-стебловою масою на рівні вищих рослин, але з нижчими даними показниками. Тотальна суха маса кореневих систем була найвищою в *C.hirta*, 754 ± 21 г м⁻², якій притаманна добре розвинута мичкувата і кореневищна система, і тотальна суха ризоїдна маса складала лише 306 ± 9 г м⁻² в *P. commune* (табл. 9.4.1).

Табл. 9.4.1 Показники ефективності багатоелектродних біосистем на основі різних видів рослин

Рослинний компонент біосистем	Висота рослини, м	Накопичення листяно-стеблової маси, г м ⁻²	Накопичення кореневої маси, г м ⁻²	Коренева система, тип	Потужність, мВт м ⁻² PGA	Напруга, мВ
<i>O. basilicum</i>	0.33±0.014	382±10	459±12	стрижнева	654±17	1017±20
<i>A. plantago-aquatica</i>	0.35±0.017	458±14	608±23	мичкувата	702±18	1086±19
<i>F. arundinacea</i>	0.32±0.015	534±19	685±18	кореневище	888±21	1091±31
<i>C. palustris</i>	0.30±0.016	442±11	613±12	кореневище	773±12	1198±30
<i>P. commune</i>	0.20±0.011	396±8	*306±9	- *ризоїди	560±15	1010±23
<i>C.hirta</i>	0.37±0.012	612±17	754±21	кореневище	950±25	1126±25

* накопичення ризоїдної маси

Найвища потужність зафіксована у біосистемах для енергоефективних будинків з *F. arundinaceae* та біосистемах з *C. hirta* для зелених дахів (табл. 9.4.1), тобто, у біосистем з найвищими показниками накопиченої листяно-стеблової і кореневої маси. Ймовірно, висока здатність до генерації біоелектрики зумовлена розвинутими кореневищами, значною кількістю додаткових коренів, притаманних цим видам рослин, та високим накопиченням їх як наземної фотосинтетичної, так і кореневої маси. Як відомо, кожному виду рослин властивий свій ризодипозит – рівень екскретованих коренями фотосинтетантів та вторинних метаболітів – від яких і залежить розвиток електрико-генеруючих мікроорганізмів. Ця ознака може корелювати з ступенем розвитку кореневої системи і з розвитком наземної біомаси. Найнижчою біоелектропродуктивністю характеризувалися біосистеми на основі рослин з найнижчими показниками накопичення кореневої і листяно-стеблової маси, біосистеми з однорічними рослинами з нерозвинутими

стрижневою кореневою системою та ризоїдами. До останніх належить *O. basilicum* та мох зозулин льон *P. commune*.

Проте, очевидно також, що біоелектрогенез є багатофакторно залежним процесом, і морфологічні параметри рослин біосистем є хоч важливими, але не є єдиними факторами впливу на їх ефективність. Ефективність біосистем, розроблених у світі є невисокою, тільки кільком науковим групам вдалося досягнути потужності вище 100 мВт м⁻² (Helder et al., 2010, 2012, Hubenova and Mitov, 2012, Wetser et al., 2015).

Вартість одного модуля всіх біосистем для енергоефективних будинків та зелених дахів, представлені в табл. 9.4.2 Вартість електро-біосистем коливалася

Табл. 9.4.2 Вартість компонентів одного модуля біосистем

Складові елементи	Біосистема					
	<i>O. basilicum</i>	<i>A. plantago-aquatica</i>	<i>F. arundinacea</i>	<i>C. palustris</i>	мохи	<i>C.hirta</i>
	Вартість, EUR					
Анодна система	0.11	1.33	1.33	0.89	0.89	0.89
Катодна система	0.01*/ 0.21	0.11*/1.03	0.11*/1.03	0.09*/0.82	0.09*/0.82	0.09*/0.82
Рослинний компонент	0.01	2.50	0.03	2.34	5.40	2.52
Субстрат	0.07	0.45	0.67	0.67	0.67	0.67
Контейнер	0.65**	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
Загальна вартість, Е	0.84/1.05	5.79/6.71	3.54/4.46	5.39/6.12	8.45/9.18	5.57/6.3

* використання відходів електро-транспорту для конструювання катодної системи,

** використання відходів харчової промисловості як контейнерів для компактних систем

від 0.84 до 9.18 EUR за один біомодуль. Найбільш коштовним елементом біомодуля є рослинний компонент та сам пластиковий контейнер. За рахунок використання дешевих електродних матеріалів, а також можливості використання відходів електротранспорту як катодів, вартість електродних матеріалів не є визначальною. Найбільш бюджетним виявився компактний 0.6 л біомодуль на основі базилика кімнатного *O. basilicum* та костриці очеретяної *F. arundinacea* за рахунок використання насіння рослин, а також відходів харчової промисловості як контейнерів для компактних систем з базиликом. Існує можливість додаткового здешевлення біосистем через використання ґрунтового субстрату та насіння/розсади широко розповсюджених рослин з довкілля.

Подяка

Виявляю свою щирю подяку провідному конструктору Олександру Медведєву за консультації і магістрам екологам Христині Гамкало та Вікторії Вакулюк за допомогу в реєстрації біоелектричних показників, Богдану Валько та Назару Стемпіцькому за технічну допомогу в експериментах та конструюванні систем збору біоелектрики.

Висновки до розділу 9

Осока шершаволиста *C. hirta* є оптимальним біокомпонентом біосистем генерації біоелектрики для експлуатації у відкритому ґрунті на дахах, оскільки є зимостійкою, виживає в посушливих умовах та швидко відновлює електроактивність після зволоження, має потенціал до очищення забруднень. А також, *C. hirta* характеризується найвищим накопиченням кореневої та листяно-стеблової маси серед досліджуваних рослин як біокомпонентів біосистем. Річний експеримент, проведений на університетських дахах в кліматичних умовах Західної України показав, що метеорологічні умови мають істотний вплив на функціонування електро-біосистем. Лімітуючим фактором для роботи електро-

біосистем з осокою є температури нижче 0°C та тривалі посушливі періоди з нижче як 5 мм опадів/день під час сприятливих плюсових температур довкілля.

Електропродуктивність біосистем в засушливих умовах та в зимовий період падає без організованих систем зрошування та термоізоляції, але, на відміну від систем з мохами, коли період відновлення є тривалим, повністю відновлює свій рівень при підйомі температури та відновленні опадів за короткий період часу. Для ефективної роботи біосистем оптимальними факторами є опади близько 5.1 мм/день, регулярне зволоження, та плюсові температури, вище 0°C. Максимальна середньотижнева сила струму, 21.36 мА зафіксована у травні за оптимальних температур та сприятливому рівні зволоженості, при середньодобовій температура 11.43°C та кількості опадів 5.39 мм/день. Біосистеми з осокою можна експлуатувати цілорічно, оскільки рослини є морозостійкими.

Біосистема на основі осоки *S. hirta* характеризувалися максимальною потужністю 950 мВт/м² PGA та була ефективнішою в 1.7 разів від системи на основі мохів на зелених дахах та більш стійкою до впливу метеофакторів при 0°C та опадах 5 мм/день.

Під час зимового періоду електродні системи біосистем стикаються з проблемами функціонування через ушкодження несприятливими факторами. Проаналізувавши різні конфігурації систем електродів, біосистема 3 із вертикально розташованими електродами та із збільшеною в 1.65 разів площею контакту катодів із субстратом та посиленням кріпленням електродів виявилася найбільш перспективною моделлю біосистем. Дана біосистема є більш ефективною як в умовах короткотривалого, так і довготривалого навантаження, а також більш стійка у протистоянні пошкодуючій дії несприятливих метеофакторів, руйнівної дії води під час замерзання в зимовий період на електродні системи.

Тип кореневої системи, і зокрема наявність розвинутої мичкуватої кореневої системи чи кореневища, а також, високе накопиченням фотосинтетичної і кореневої маси є важливими прогностичними факторами для вибору ефективного рослинного біокомпонента для електро-біосистем.

Подальше вдосконалення електродних конфігурацій біосистем, застосування систем поливу та використання теплоти відпрацьованих газів систем опалення, що дасть загальне збільшення отримуваної потужності енергії, відкриє можливість використання біосистем з *Carex hirta* на екстенсивних та інтенсивних зелених дахах будівель для стабільного цілорічного отримання біоелектрики. Біосистеми з новими графіто/оцинковано-стальними електродними системами з посиленням кріпленням та рослиною *C. hirta* і ґрунтом як субстратом є багатообіцяючим джерелом генерації поновлюваної та стабільної зеленої енергії. Представлені дослідження є ще одним кроком до розробки ефективної біотехнології отримання біоелектрики на зелених дахах.

Матеріали розділу опубліковані в публікаціях:

- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2019).** Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10 (1), 39-44. doi: 10.15421/021906. **Web of Science**
- Русин, І. Б., Фігурка, О. М., Фігурка, У. М., Джура, Н. М., Мороз, О. М., & Новіков, В. П. (2009).** Мікробіота нафтозабрудненого ґрунту, рекультивованого рослинами *Carex hirta*. *Мікробіологія і Біотехнологія*, 8, 41-47. **Advanced Sciences Index, фахове видання**
- Джура, Н. М., Мороз, О. М., Цвілінюк, О. М., Терек, О. І., **Русин, І. Б., & Романюк О. І. (2008).** Відновлення нафтозабрудненого ґрунту за участю рослин *Carex hirta*, *Збірник наукових праць Уманського державного аграрного університету „Основи формування продуктивності сільсько-господарських культур за інтенсивних технологій вирощування”*, Київ, 197-203. **фахове видання**
- Мороз, О. М., Джура, Н. М., Безноско, Г. Я., Перетятко, Т. Б., **Русин, І. Б., Цвілінюк, О. М., Кулачковський, О. Р., Терек, О. І., & Гудзь, С. П. (2006).** Вплив рослин *Carex hirta* на мікрофлору нафтозабруднених ґрунтів. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, 19, 149-154. **фахове видання**

Література до розділу 9

- Alekseev, Y. E., & Novikov, Y. S. (1971). *Opredelitel osoki sredney polosy evropeyskoy chasti SSSR po vegetativnym organam* [The determinant of Sedges of the middle region of the European part of the USSR through the vegetative organs]. Nauka, Moscow (in Russian).
- Banting, D., Doshi, H., Li J., Missios, P., Au A., Currie, B. A., & Verrati, M. (2005). Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the City of Toronto. Ryerson University, Toronto.
- Brunelli, D., Tosato P., & Rossi, M. (2016). Flora Health Wireless Monitoring with Plant-Microbial Fuel Cell. *Procedia Engineering*, 168, 1646–1650. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.481
- Behera, B. K., & Varma, A. (2016). *Microbial Resources for Sustainable Energy*. Springer International Publishing, Switzerland.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42, 1582–1591. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004
- Chen, S., Patil, S. A., Brown, R. K., & Schröder, U. (2019). Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: Transitioning from fundamental studies to practical implementation. *Applied Energy*, 233–234, 15–28. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.015
- Chen, Z., Huang, Y.-C., Liang, J.-H., Zhao, F., & Zhu, Y.-G. (2012). A novel sediment microbial fuel cell with a biocathode in the rice rhizosphere. *Bioresource Technology*, 108, 55–59. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.040
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, 40, 2426–2432. doi: 10.1021/es051652w

- Dai, J. , Wang, J.-J., Chow, A. T., & Conner, W. H. (2015). Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117
- De Schamphelaire, L., Van Den Bossche, L., Hai, S. D., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 42(8), 3053–3058. doi: 10.1021/es071938w
- Deng, H., Wu, Y.-C., Zhang, F., Huang, Z.-C., Chen, Z., Xu, H.-J., & Zhao, F. (2014). Factors affecting the performance of single-chamber soil microbial fuel cells for power generation. *Pedosphere*, 24, 330–338. doi: 10.1016/S1002-0160(14)60019-9
- Dzura, N. M., Moroz, O. M., Tsvilyniuk, O. M., Terek, O. I., Rusyn, I. B., & Romaniuk, O. I. (2008). Vidnovlennia naftozabrudnenoho gruntu za uchastiu roslyn *Carex hirta* [Reparation of oil-contaminated soil with the participation of plants *Carex hirta*]. Collection of scientific works of Uman State Agrarian University "Basis of Formation of Productivity Development of Agricultural Cultures for Intensive Growing Technologies", 197–203 (in Ukrainian).
- Egorova, T. V. (1999). Osoki (*Carex* L.) Rossii i sopredelnykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR) [The Sedges (*Carex* L.) of Russia and neighboring states (within the former USSR)]. St. Petersburg GHFA and the Missouri Botanical Garden, St. Petersburg, St. Louis (in Russian).
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41, 1276–1286. doi:10.21273/HORTSCI.41.5.1276
- Gubanov, I. A., Kiseleva, K. V., Novikov, V. S., & Tihomirov, V. N. (2002). *Carex hirta* L. – Osoka mokhnataya ili korotkovolosistaya [*Carex hirta* L. – The sedge shaggy or short-haired]. Illustrated determinant of plants of Central Russia. In 3 volumes. V.1. Ferns, horsetails, plauns, gymnosperms, angiosperms (monocots). Community of scientific publications, KMK, Institute of Technology researches, Moscow (in Russian).

- Harnisch, F., Wirth, S., & Schröder, U. (2009). Effects of substrate and metabolite crossover on the cathodic oxygen reduction reaction in microbial fuel cells: platinum vs. iron(II) phthalocyanine based electrodes. *Electrochemistry Communications*, *11*, 2253–2256. doi:10.1016/j.elecom.2009.10.002
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, *101*(10), 3541–3547. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124.
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2011). New plantgrowth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, *104*, 417–423. doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.005
- Helder, M. (2012^a). Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell. Electricity generation with living plants – from lab to application. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL.
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012^b). The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, *5*, 70. doi: 10.1186/1754-6834-5-70
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T, Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, *51*, 1–7. doi:10.1016/j.biombioe.2012.10.011
- Hubenova, Y., & Mitov, M. (2012). Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*, *87*, 185–191. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008
- Hong, S. W., Chang, I. S., Choi, Y. S., & Chung, T. H. (2009). Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *100*, 3029–3035. doi: 10.1016/j.biortech.2009.01.030

- Jermy, A. C., Simpson, D. A., Foley, M. J. Y., & Porter, M. S. (2007). *Sedges of the British Isles*. BSBI Handbook No. 1. Third edition. Botanical Society of the British Isles, London.
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. doi: 10.1007/s00253-008-1410-9
- Kalathil, S., Patil, S. A., & Pant, D. (2017). Microbial Fuel Cells: Electrode materials. In: Wandelt, K. & Vadgama, P. (Eds). *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface science and Electrochemistry*. Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-12-409547-2.13459-6
- Konasova, S. (2014). The role of green roofs in sustainable construction, 470–478. In *Proceedings of Creative Construction Conference*, 21–24 June 2014. Elsevier Procedia, Prague, Czech Republic.
- Li, L. H., Sun, Y. M., Yuan, Z. H., Kong, X. Y., & Li, Y. (2013). Effect of temperature change on power generation of microbial fuel cell. *Environmental Technology*, 34(13-16), 1929-1934. doi:10.1080/09593330.2013.828101
- Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy*, 172010, 1–10. doi:10.1155/2013/172010
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresourc Technology*, 195, 115–121. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.098

- Moqsud, M. A., Gazali, T. A., Omine, K., & Nakata, Y. (2017). Green electricity by water plants in organic soil and marine sediment through microbial fuel cell. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(2), 160–165. doi:10.1080/15567036.2016.1159263
- Nitorisavut, R., Thanh, C. N. D., & Regmi, R. (2017). Microbial fuel cells: Advances in electrode modifications for improvement of system performance. *International Journal of Green Energy*, 14(8), 712–723. doi.org/10.1080/15435075.2017.1326049
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-S., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*, 186, 270–275. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.014
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Kohler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green Roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57 (10), 823–833. doi:10.1641/B571005
- Picot, M., Lapinsonniere, L., Rothballe, M. & Barriere, F. (2011). Graphite anode surface modification with controlled reduction of specific aryl diazonium salts for improved microbial fuel cells power output. *Biosensors & Bioelectronics*, 28, 181–188. doi: 10.1016/j.bios.2011.07.017
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745–756. doi:10.1016/j.aej.2015.03.031
- Rusyn, I. B., Figurka, O. M., Figurka, U. M., Dzhura, N. M., Moroz, O. M., & Novikov, V. P. (2009). Mikrobiota naftozabrudnenoho gruntu, rekultyvovanoho roslynamy *Carex hirta* [Microorganisms of oil polluted soils recultivated by *Carex hirta*]. *Mikrobiologia i Biotechnologia*, 8, 41–47 (in Ukrainian).
- Rusyn, I. B., & Medvediev, O. V. (2018). Sposib otrymania bioelektryky iz konteineru z roslynamy za dopomohoiu systemy elektrodov [The method for bioelectricity obtaining from a container with plants using a system of electrodes]. Patent of Ukraine 122556, filed August 28, 2017, issued January 10, 2018 (in Ukrainian).

- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2018). *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. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126 (3), 404–410. doi: 10.1016/j.jbiosc.2018.03.00
- Scholz-Barth, K. (2001). Green roofs; Stormwater management from the top down. *Environmental Design & Construction*, 4, 63–70.
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.10.001.
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology & Biochemistry*, 74, 1271–1273. doi: 10.1271/bbb.90852
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 86(3), 973–981. doi: 10.1007/s00253-010-2440-7
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 94(2), 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6
- Wang, A.-J., Liang, B., Li, Z.-L., & Cheng, H.-Y. (2018). Bioelectrochemistry stimulated environmental remediation. From Bioelectrorespiration to Bioelectrodegradation. Verlag Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-8542-0_9
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*, 83, 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006

- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, *185*, 642–649. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122
- Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, *47*, 126–131. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.06.029
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, *42*(31), 7266–7273. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.003

ВИСНОВКИ

В дисертації представлено нове вирішення біотехнологічної проблеми рослинно-мікробних біосистем шляхом розроблення нових, ефективних та економічно вигідних підходів до цілорічного отримання біоелектрики в енергоефективних будинках.

1. Розроблено цілорічно ефективні біосистеми на основі рослин *A. plantago-aquatica*, *F. arundinacea*, *C. palustris*, *C. hirta*, *O. basilicum*, *H. soleirolii* та мохів *H. cypressiforme*, *P. commune*, *L. glaucum* для генерації біоелектрики в енергоефективних будинках та зелених дахах.

2. Біосистема з *F. arundinacea* характеризувалася на 20.9 % вищою потужністю та була в 1.5 раз більш економічно вигідною, ніж біосистема з *A. plantago-aquatica*, що дає можливість використовувати її в енергоефективних будинках всередині як джерело біоелектрики.

3. Біосистема на основі *C. hirta* характеризувалася потужністю 950 мВт/м² PGA та була ефективнішою в 1.7 разів від системи на основі мохів, що розкриває перспективи її використання для генерації біоелектрики на дахах при температурі вище 0°C та кількості опадів 5 мм/доба.

4. Вперше досягнуто прогресу в компактності та кількості модулів біосистем при збереженні виходу біоелектрики. Дво- і три-модульні 0.6 л багатоелектродні біосистеми, базовані на прямих чи декоративних рослинах *O. basilicum* і *H. soleirolii* служили автономним та екологічно чистим джерелом енергії для приладів з низьким енергоспоживанням та світлодіодів в режимі реального часу, замінюючи батарейки 1.5 В та 3.0 В. Максимальні зафіксовані значення густини струму в тримодульній біосистемі становили 407 мА/м² та густини потужності 188 мВт/м² PGA.

5. Показано високу кореляцію між генерацією біоелектрики та ростом рослин: коефіцієнт Пірсона становив від 0.67 до 0.98 в залежності від виду рослини та умов вирощування. Використання саджанців рослин у біотехнології

забезпечує її ефективну роботу з перших днів після інсталяції. Можливість використання насіння рослин *F. arundinacea* та *O. basilicum* для рослинно-мікробних біосистем суттєво здешевлює біотехнологію.

6. Вперше показано позитивний ефект бактерій *Desulfovibrio* sp. та аннелід *L. terrestris* як енхансерів, які підвищують генерацію біоелектрики біосистем з *A. plantago-aquatica* та *C. palustris* на 32.8% та на 14.3%, відповідно.

7. Вперше показано потенціал природних екосистем лісів і заболочених луків, агроекосистем, урбоекосистем паркових зон та техногенно забруднених газонів вздовж міських автомагістралей як джерела поновлюваної біоелектрики за кліматичних умов заходу України. Біоелектрика біосистем агрокультур, сильно забруднених газонів вздовж автотрас та біотопів занедбаних паркових зон з ущільненим ґрунтом внаслідок антропогенного навантаження була нижчою на 9.2%, 14.4% та 20.3%, відповідно, від біосистем лісу.

8. Біосистеми газонів вздовж автотрас є резистентними до забруднення важкими металами. Рівень біоелектрики знижується при забрудненні одночасно кількома важкими металами високого класу небезпеки, що перевищують ГДК більше як в 10 разів.

9. Вперше розроблено біосистему на основі нової, економічно вигідної пари електродів: графітових катодів (відходів електротранспорту) та перфорованих оцинкованих сталевих анодів для отримання біоелектрики з ґрунту. Показано, що редукування міжелектродної відстані при комбінуванні паралельно-послідовного з'єднання багатоелектродних біосистем є ефективним способом максимізації рослинно-мікробної біоелектрики.

Біосистеми, розроблені в дисертаційній роботі, впроваджені при озелененні енергоефективних будинків для LED освітлення житлових комплексів та для живлення цифрових термометрів/гігрометрів ТзОВ «ГАЛИЦЬКА БУДІВЕЛЬНА ГІЛЬДІЯ» та ПП «Укртекскolor» у житловому комплексі «Park Tower» у м. Львові та в житловому комплексі «ПАРУС СІТІ».

*Розроблені біотехнології застосовані в наукових проектах європейських та американських університетів та наукових інститутів, зокрема, відділу хімії та біомолекулярних наук Кларксон Університету (Потсдам, НьюЙорк, **США**), Національного технологічного Інституту Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL) і Tecnológico Nacional de México (TecNM) (El Llano Aguascalientes, **Мексика**), Інституту Агрофізики Польської Академії Наук (Люблін, **Польща**), Інституту макромолекулярної хімії Академії Наук Чеської Республіки (Прага, **Чехія**) для розвитку наукових досліджень.*

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації, які розкривають основний зміст дисертації:

Розділ монографії

1. Русин І. Б., Дячок В. В. (2020). Перспективи використання природних лісових екосистем для отримання рослинно-мікробної біоелектрики. В: Колективна монографія «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» Львів, ТзОВ "ЗУКЦ", 124-140. *(здобувачу належить ідея дослідження, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання розділу монографії)*

Статті у наукових виданнях інших країн та індексованих міжнародними наукометричними базами даних Scopus та Web of Science

2. Apollon, W., **Rusyn, I.**, González-Gamboa, N., Kuleshova, T., Luna-Maldonado, A.I., Vidales-Contreras, J.A., & Kamaraj, S.-K. (2022). Improvement of zero waste sustainable recovery using microbial energy generation systems: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 817, 153055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153055>. **Scopus Q1, Web of Science, Netherlands** *(здобувачу належить частина робочих гіпотез та планування статті, аналіз та обґрунтування літературних даних, написання статті)*

3. **Rusyn, I.B.** (2021). Role of microbial community and plant species in performance of plant microbial fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111697 (19p). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111697>. **Scopus Q1, Web of Science, United Kingdom** (здобувачу належить ідея статті, аналіз літературних даних, обґрунтування і формування висновків, написання статті)
4. **Rusyn, I.B., Medvediev, O.V., & Valko, B.T.** (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323-1334. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02934-3>. **Scopus Q2, Web of Science, Iran** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
5. **Rusyn, I., Malovanyu, M., Tymchuk, I., Synelnikov, S.** (2020). Effect of mineral fertilizer encapsulated with zeolite and polyethylene terephthalate on the soil microbiota, pH and plant germination. *Ecological Questions*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.12775/EQ.2021.007> **Scopus Q4, Poland** (ідея дослідження належить співавторам, здобувачу належить розробка робочих гіпотез, планування експериментів, проведення всіх експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
6. **Rusyn, I.B., & Namkalo, Kh.R.** (2020). Electro-biosystems with mosses on green roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(1), 20-31. <https://doi.org/10.5755/j01.ere.m.76.1.22212>. **Scopus Q4, Lithuania** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
7. **Rusyn, I.B., Vakuliuk, V.V., & Burian, O.V.** (2019). Prospects of use of *Caltha palustris* in soil plant-microbial eco-electrical biotechnology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(2), 233-238. <https://doi.org/10.15421/021935>. **Scopus Q4, Web of Science, United Kingdom** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

Science, фахове видання категорії А (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

8. Rusyn, I.B., & Valko, B.T. (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20(3), 211-229. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674>. **Scopus Q3, USA** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

9. Rusyn, I.B., & Hamkalo, Kh.R. (2019). Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(1), 39-44. <https://doi.org/10.15421/021906>. **Scopus Q4, Web of Science, фахове видання категорії А** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

10. Rusyn, I.B., & Hamkalo, Kh.R. (2018). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62 (2), 170-179. <https://doi.org/10.14232/abs.2018.2.170-179>. **Scopus Q3, Hungary**

(здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

11. Moroz, O.M., Kulachkovs'kyi, O.R., Rusyn, I.B., Gnatush S.O., Pavlova, I.O., Lytvyn, Z.V. (2007). Ethanol into acetaldehyde bioconversion by mutant strains of *Hansenula polymorpha* Felcao de Moraes & Dália Maia. *Mikrobiologichnyi zhurnal (Kiev, Ukraine : 1993)*, 69(1), 20-34. **Scopus Q4** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

Статті у інших наукових фахових виданнях України

- 12. Русин, І.Б., Медведєв, О.В., & Дячок, В.В. (2021).** Конструювання мультиелектродних електро-біосистем з *L. minor*. *Екологічні науки*, 39, 103-105. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.16>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 13. Русин, І.Б., & Дячок, В.В. (2021).** Роль перемішування субстрату для ефективності водних електро-біосистем. *Екологічні науки*, 38, 29-31. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.5-38.6>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 14. Русин, І.Б., & Дячок, В.В. (2021).** Залежність біоелектричних параметрів електро-біосистем від площі електродів. *Екологічні науки*, 37, 162-165. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.24>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
- 15. Rusyn, I., & Djachok, V. (2021).** Effect *Lemna minor* population density on bioelectric parameters of electro-biosystems. *Environmental problems*, 6(4), 6 (4), 195-200. <https://doi.org/10.23939/ep2021.04.195>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

16. Русин, І.Б., Медведєв, О.В., & Дячок, В.В. (2021). Вплив міжелектродної відстані на біоелектричні показники електро-біосистем. *Екологічні науки*, 36, 123-126. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.19>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
17. Rusyn, I., & Djachok, V. (2021). Wetland meadows of *Carex acutiformis* as a source of bioelectricity. *Environmental problems*, 6(3), 125-129. <https://doi.org/10.23939/ep2021.03.125>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
18. Rusyn, I., & Djachok, V. (2021). Bioelectric parameters of *Pinus silvestris* forest ecosystems. *Environmental problems*, 6(2), 59-63. <https://doi.org/10.23939/ep2021.02.059>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
19. Русин, І. Б., Медведєв, О.В., & Патлатюк, О.Ю. (2020). Перспективи отримання біоелектрики у паркових екосистемах міст. *Екологічні науки*, 29, 117-124. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.1.19>. **Index Copernicus International, фахове видання категорії В** (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)
20. Русин, І.Б., Медведєв, О.В., Воронько, В.В. & Пашук, А.В. (2020). Вплив забруднення важкими металами на біоелектричний потенціал біотопів. *Екологічні науки*, 30, 53-59. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.9>. **Index**

Copernicus International, фахове видання категорії В (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

21. Русин, І.Б., Медведєв, О.В., Валько, Б.Т. (2020). Біоелектрика екосистем лісів, заболочених лук та агроекосистем Західної України. *Наукові праці Лісівничої Академії наук України*, 20, 33-44. <https://doi.org/10.15421/412003>. *Index Copernicus International, фахове видання категорії В* (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

22. Мороз, О.М., & Русин, І.Б. (2012). Використання сполук нітрогену бактеріями циклу сульфуру озера Яворівське. *Мікробіологія та біотехнологія*, 2, 96-109. *Index Copernicus International, Advanced Sciences Index, фахове видання* (здобувачу належить проведення частини експериментів та аналізу результатів)

23. Джура, Н.М., Мороз, О.М., Русин, І.Б., Кулачковський, О.Р., Цвілінюк, О.М., & Терек, О.І. (2010). Вплив рослин бобу кормового (*Vicia faba* var. *minor*) на функціонування мікробних асоціацій метаболізму азоту в забрудненому нафтою ґрунті. *Ґрунтознавство*, 11(3-4), 105-112. *Advanced Sciences Index, фахове видання* (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних)

24. Русин, І.Б., Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., Джура, Н.М., Мороз, О.М., & Новіков, В.П. (2009). Мікробіота нафтозабрудненого ґрунту, рекультивованого рослинами *Carex hirta*. *Мікробіологія і Біотехнологія*, 8, 41-47. *Advanced Sciences Index, фахове видання* (здобувачу належить ідея, розробка робочих гіпотез і планування експериментів, проведення частини експериментів, аналіз результатів, формування висновків, опрацювання літературних даних, написання статті)

25. Мороз, О.М., Джура, Н.М., Безноско, Г.Я., Перетятко, Т.Б., **Русин, І.Б.,** Цвілінюк, О.М., Кулачковський, О.Р., Терек, О.І., & Гудзь, С.П. (2006). Вплив

рослин *Carex hirta* на мікрофлору нафтозабруднених ґрунтів. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, 19, 149-154. **фахове видання** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

26. Мороз, О.М., Кулачковський, О.Р., Русин, І.Б., Гудзь, С.П., Гнатуш, С.О., Перетятко, Т.Б., Паляниця, Б.Ю. & Кутько, І.О. (2004). Біогенез гліюкисом та деградативна інактивація ізоцитратліази і каталази у *Pex1* та *Pex1^{ts}* мутантів *Hansenula polymorpha*. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, 14, 148-153. **фахове видання** (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

Статті у інших наукових періодичних наукових виданнях України

27. Сабадаш, В.В., Русин, І.Б., Мальований, М.С., Гумницький, Я.М., Недадь, Х.М., & Аль, Х. (2011). Вплив гранульованих та капсульованих мінеральних добрив на фізико-хімічні властивості ґрунту та функціонування ґрунтової мікрофлори. *Сільський господар*, 5-6, 14-17 (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз частини результатів і формування частини висновків)

28. Джура, Н.М., Мороз, О.М., Цвілінюк, О.М., Терек, О.І., Русин, І.Б., & Романюк О.І. (2008). Відновлення нафтозабрудненого ґрунту за участю рослин *Carex hirta*. *Збірник наукових праць Уманського державного аграрного університету „Основи формування продуктивності сільсько-господарських культур за інтенсивних технологій вирощування”*, 197-203. (здобувачу належить проведення частини експериментів, аналіз та обробка результатів)

Посібник

29. Русин, І. Б. (2016). Основи біології: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. ФОП Афонін А.О. DoubleApublishing, Київ. (здобувачу належить ідея посібника, аналіз літературних даних, написання посібника)

Патенти України на корисну модель

30. Русин, І.Б., & Медведєв, О.В. (2018). Спосіб отримання біоелектрики із контейнера з рослинами за допомогою системи електродів. Патент України 122556, отриманий 28.08.2017, виданий 10.01.2018, бюл.1.

(особистий внесок: розробка формули, опрацювання літературних даних, планування і проведення експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, написання патенту)

31. Русин, І.Б., & Медведєв, О.В. (2016). Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту. Патент України 112093, отриманий 9 березня 2016, виданий 12 грудня 2016, бюл. 23.

(особистий внесок: розробка формули, опрацювання літературних даних, планування і проведення експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, написання патенту)

32. Русин, І.Б., & Медведєв, О.В. (2015). Спосіб прямого отримання біоелектрики з ґрунту. Патент України 98393, отриманий 17 листопада 2014, виданий 27 квітня 2015, бюл. 8.

(особистий внесок: розробка формули, опрацювання літературних даних, планування і проведення експериментів, аналіз та обробка результатів, формування висновків, написання патенту)

Опубліковані праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

33. Rusyn, I.B., Djachok, V.V. Електро-біосистеми на основі *L. minor*. І міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз довкілля в умовах надзвичайних ситуацій-2022» (Полтава, 26-27 May 2022), 514-516.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

34. Rusyn, I.B., Djachok, V.V. Dependence of bioelectricity production from electrotechnological parameters of plant-microbial electro-biosystems. International

scientific conference «Challenges, threats and developments in biology, agriculture, ecology, geography, geology and chemistry» (Lublin, Poland, July 2-3, 2021), 95-98.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 35. Русин, І.Б.** Використання біотехнології рослинно-мікробних паливних елементів для отримання біоелектрики. XXII міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (20-21 травня 2021, Київ), 928-931.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 36. Rusyn, I., Valko, B., & Nikitchuk, S. (2019).** Prospects of obtaining bioelectricity in ecosystems and settlements of border territories Poland and Ukraine. Miedzynarodova konferencja naukowa i praktyczna. Aktualne problemy ochrony srodowiska Ukrainsko-Polskiej strefy przygranicznej (23-25 October 2019, Lviv), 86-87.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 37. Rusyn, I.B., & Namkalo, Kh.R. (2015).** Receiving of bioelectricity from polluted areas. Збірник наукових праць V Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю (23-26 вересня 2015, Вінниця), 189. ТОВ «Нілан-ЛТД», Вінниця.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 38. Вакулюк, В.В., Бур'ян, О.В., & Русин, І.Б. (2015).** Використання калюжниці болотяної для отримання біоелектрики *in situ*. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез XI Міжнародної наукової конференції (20-23 квітня 2015, Львів), 212-213. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 39. Гамкало, Х.Р., & Русин, І.Б.** (2015). Вплив забруднення важкими металами на генерацію біоелектрики ґрунтовими мікроорганізмами в природних умовах. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез XI Міжнародної наукової конференції (20-23 квітня 2015, Львів), 216-217. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 40. Rusyn, I.B., & Patlatyuk, O.Y.** (2014). Innovative approach to generate energy with Microbe-plant associations of urban soil in a park areas. EPPESEM. 3-й міжнародний конгрес. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Збірник матеріалів (17-19 вересня 2014, Львів), 74, ТзОВ «ЗУКЦ», Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 41. Rusyn, I.B.** (2014). Perspective using of bioelectricity of microbe-plant associations of urban soil. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application» (October 20-22, 2014, **Dubai, UAE**), 91-94. World Science, RS Global, Dubai.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 42. Rusyn, I.B.** (2014). Bioelectricity of plant-microbe associations of urban soil in a park areas. Proceedings of the 1st International Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Oceans Countries» (25 October 2014, **Tokyo, Japan**). Volume II, 75-78. Tokyo University Press, Tokyo.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 43. Патлатюк, О.Ю., Воронько, В.В., & Русин, І.Б.** (2014). Електроенергія, що генерується ґрунтовими мікроорганізмами в міській місцевості. «Біологія: від молекули до біосфери» Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих науковців (Харків, 18-20 листопада 2014), 153-154. ФОП Шаповалова Т.М., Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 44.** Бур'ян, О.В., Вакулюк, В.В., & Русин І.Б. (2014). Калюжниця болотна як джерело біоелектроенергії на зелених дахах. Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих науковців «Біологія: від молекули до біосфери» (Харків, 18-20 листопада 2014), 147-148. ФОП Шаповалова Т.М., Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 45.** Нікітчук, С.В., Валько Б.Т., Воронько В.А., Селецький І.С., Стемпіцький Н.І., & Русин І.Б. (2014). Розробка технології збору біоелектрики ґрунту. «Біологія: від молекули до біосфери» Матеріали ІХ Міжнародної наукової конференції молодих науковців (Харків, 18-20 листопада 2014), 152-153. ФОП Шаповалова Т.М., Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 46.** Nikitchuk, S.V., Valko, B.T., & Rusyn, I.B. (2014). Bioelectricity produced by microbial-plant association of forest and wet meadows of Polesse. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез Х Міжнародної наукової конференції (8-11 квітня 2014, Львів), 138-139. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 47.** Нікітчук, С.В., Валько, Б.Т., & Русин, І.Б. (2014). Біоелектрика мікроборослинних асоціацій. «Біотехнологія: звершення та надії»: збірник ІІІ Всеукраїнської науково практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених (15-16 травня 2014, Київ), 80. ВЦ НУБіП України, Київ.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 48.** Валько, Б.Т., Змислий, А.В., Нікітчук, С.В., & Русин, І.Б. (2013). Мікроборослинні асоціації ґрунту як альтернативне джерело енергії. «Екологія,

неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансованого користування» Матеріали II Міжнародної наукової конференції студентів, магістрантів, аспірантів та молодих вчених (5-6 грудня 2013, Харків), 14-15. ХНУ імені В. Н. Каразіна, Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 49.** Валько, Б.Т., Змислий, А.В., Нікітчук, С.В., & Русин, І.Б. (2013). Біоелектрика ґрунту та мікробо-рослинних асоціацій. «Біологія: від молекули до біосфери». Матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених (3-6 грудня 2013, Харків), 287-288. ФОП Шаповалова Т.М., Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 50.** Русин, І.Б., & Сабадаш, В.В. (2011). Стан ґрунтової мікрофлори при застосуванні капсульованих мінеральних добрив. «Біологія: від молекули до біосфери». Матеріали VI Міжнародної конференції молодих науковців (22-25 листопада 2011, Харків), 307-308. ФОП Шаповалова Т.М., Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 51.** Русин, І.Б. (2011). Біодеструкція вуглеводнів нафти за участю мікроорганізмів. X Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання». Збірник наукових статей (19-20 травня 2011, Львів), ЛьвЦНП, Львів, 212.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 52.** Сайкевич, І., & Русин, І. (2010). Біодеструкція вуглеводнів нафти азотфіксуючими і целюлозоруйнуючими бактеріями та дріжджами. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез VI Міжнародної наукової конференції (21-24 вересня 2010, Львів), 167. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 53. Сайкевич, І., & Русин, І.** (2010). Утилізація вуглеводнів нафти мікроорганізмами. Новітні досягнення біотехнології: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (21-22 жовтня 2010, Київ), 98-99. Мегапринт, Київ.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 54. Фігурка, О., Фігурка, У., Русин, І., & Новіков, В.** (2009). Утилізація нафти та синтез біоПАР виділеними із нафтозабрудненого ґрунту азотфіксуючими та целюлозоруйнуючими мікроорганізмами. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез V Міжнародної наукової конференції (12-15 травня 2009, Львів), Том 2, 166. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 55. Русин, І.Б., Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., & Новіков, В.П.** (2008). Синтез біоПАР мікроорганізмами-деструкторами вуглеводнів нафти. «Біотехнологія. Наука. Освіта. Практика»: Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 11-13 листопада 2008), 98-99.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 56. Figurka, O.M., Figurka, U.M., Rusyn, I.B., & Novikov, V.P.** (2008). Aerobic bioremediation measures for cleaning of soil from oil contamination. «The Coins 2008». International Conference for Students of Nature Sciences (11-15 March 2008, Vilnius), The book of abstracts, 61-62.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 57. Русин, І.Б., Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., & Новіков, В.П.** (2008). Утилізація вуглеводнів нафти азотфіксуючими та целюлозоруйнуючими мікроорганізмами, виділеними з нафтозабруднених ґрунтів. Матеріали

міжнародної науково-практичної конференції студентів і аспірантів та молодих вчених (20-23 березня 2008, Київ), 101-102.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 58.** Фігурка, О., Русин, І., & Новіков, В. (2008). Деструкція вуглеводнів нафти азотфіксуючими бактеріями. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез IV Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів (7-10 квітня 2008, Львів), 345. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 59.** Фігурка, У., Русин, І., & Новіков, В. (2008). Участь целюлозоруйнуючих мікроорганізмів в біодеструкції вуглеводнів нафтозабруднених ґрунтів. «Молодь і поступ біології»: Збірник тез IV Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів (7-10 квітня 2008, Львів), 346. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 60.** Русин, І.Б., Фігурка, О.М., Фігурка, У.М., & Новіков, В.П. (2008). Участь азотфіксуючих та целюлозоруйнуючих мікроорганізмів в біодеструкції вуглеводнів нафтозабруднених ґрунтів. «Біологія: від молекули до біосфери»: Матеріали III Міжнародної конференції молодих науковців (18-21 листопада 2008, Харків), 459-460. ФОП Шаповалова Т.М., Харків.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 61.** Rusyn, I.B., Figurka, O.M., Figurka, U.M., Fedak, R.T., Perminova, I.M., Dzhura, N.M., Moroz, O.M., & Novikov, V.P. (2007). Recultivation of oil polluted soils by microorganisms and rough sedge. «Modern Problems of Microbiology and Biotechnology»: International scientific conference of young scientists and students (28-31 May 2007), Book of Abstracts, 108. Astroprint, Odesa.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 62.** Пермінова, І., Русин, І., Джура, Н., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Дріжджі і плісеневі гриби нафтозабрудненого ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 357-358. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 63.** Фігурка, У., Русин, І., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Вплив нафтового забруднення на целюлозоруйнуючу мікрофлору ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 376. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 64.** Фігурка, О., Русин, І., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Азотфіксуючі бактерії нафтозабрудненого ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 375. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)

- 65.** Федак, Р., Русин, І., Мороз, О., & Новіков, В. (2007). Анаеробна мікробіота нафтозабрудненого ґрунту. «Молодь та поступ біології»: Збірник тез III Міжнародної наукової конференції (23-27 квітня 2007, Львів), 373-374. СПОЛОМ, Львів.

(Здобувачу належить ідея, постановка задачі та експерименту, участь в експерименті, обґрунтування та узагальнення отриманих результатів, написання тез)



ТЗОВ "ГАЛИЦЬКА БУДІВЕЛЬНА ГІЛЬДІЯ"

Юридична адреса: 79052, м. Львів, вул.Рудненська, будинок №14-А

т.032-232-56-57

Офіс: м. Львів, вул.Рудненська, будинок №14-А

ЄДРПОУ 37831898

р/р 2600 101 612 526 відкритий у ПАТ «КРЕДОБАНК»,

МФО 325365,св..ПДВ 200118247

АКТ

впровадження у виробництво

при будівництві житлових комплексів

екобіотехнологій, розроблених в дисертаційній роботі та наукових публікаціях і патентах Русин Ірини Богданівни

Джерело впровадження: нижче наведені наукові публікації і патенти канд. біол. наук, докторанта і доцента кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська Політехніка» Русин Ірини Богданівни за темою дисертаційної роботи, поданої на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук.

- Rusyn I. B. & Hamkalo Kh. R. (2020). Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(1): 20–31. <https://doi.org/10.5755/j01.arem.76.1.22212>
- Rusyn I. B., Vakuliu, V. V., & Burian O. V. (2019). Prospects of use of *Caltha palustris* in soil plant-microbial eco-electrical biotechnology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(2): 233–238. <https://doi.org/10.15421/021935>.
- Rusyn I. B. & Valko B. T. (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20(3): 211–229. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674>

- Rusyn I. B., & Hamkalo Kh. R. (2019). Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(1): 39-44. <https://doi.org/10.15421/021906>.
- Rusyn, I. B. & Hamkalo Kh. R. (2018). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62(2): 170-179. <https://doi.org/10.14232/abs.2018.2.170-179>.
- Русин, І.Б., & Медведєв, О.В. (2018). Спосіб отримання біоелектрики із контейнера з рослинами за допомогою системи електродів. Патент України 122556, отриманий 28.08.2017, виданий 10.01.2018.
- Русин, І.Б., & Медведєв, О.В., (2016). Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту. Патент України 112093, отриманий 9 березня 2016, виданий 12 грудня 2016.
- Русин, І.Б., & Медведєв, О.В. (2015). Спосіб прямого отримання біоелектрики з ґрунту. Патент України 98393, отриманий 17 листопада 2014, виданий 27 квітня 2015.

Місце та мета впровадження: біотехнологічні системи, розроблені Русин І.Б., вмонтовані всередині будинків та на їх балконах і терасах для автономного енергопостачання LED освітлення, що живиться відновлювальною енергією асоціацій рослин та ґрунтової мікрофлори електро-біосистем в контексті створення енергоефективних будинків. Новий метод отримання біоелектрики впроваджено при проектуванні та будівництві житлових комплексів нашою компанією, зокрема, житлового комплексу Park Tower у м. Львові, вул. Стрийська, 86.

Директор



Т.Мужик

АКТ
впровадження у виробництво
при будівництві житлових комплексів
електро-біосистем, розроблених в дисертаційній роботі
та наукових публікаціях і патентах
Русин Ірини Богданівни,
канд. біол. наук, доцента, докторанта
кафедри екології та збалансованого природокористування
Національного університету «Львівська політехніка»

Найменування та мета впровадження: рослинні електро-біосистеми як джерело живлення для LED освітлення та цифрових термометрів і гігрометрів.

Джерело впровадження: представлене в нижче наведених наукових публікаціях та дисертаційній роботі, поданої на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук Русин Ірини Богданівни.

- Rusyn I.B., Medvediev O.V., Valko B.T. (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323 – 1334. doi: 10.1007/s13762-020-02934-3
- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2020). Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76 (1), 20 – 31. doi: 10.5755/j01.arem.76.1.22212
- Rusyn, I. B., & Valko, B. T. (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20 (3), 211-229. doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674.
- Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2019). Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10 (1), 39-44. doi: 10.15421/021906.
- Русин, І.Б., & Медведєв, О.В. (2018). Спосіб отримання біоелектрики із контейнера з рослинами за допомогою системи електродів. Патент України 122556, отриманий 28.08.2017, виданий 10.01.2018

Місце впровадження: при проектуванні та будівництві ЖК «ПАРУС СІТІ» у м. Львові по вул. Кульпарківська, 93. Автономне енергоживлення LED освітлення та цифрових термометрів і цифрових гігрометрів завдяки електро-біосистемам, інсталюваними всередині будинків та на їх балконах і терасах.

Директор ПП «Укртексколор»



Стефанюк А.Б.

CONFIRMATION OF RESULTS IMPLEMENTATION



PhD, DrSci, Senior Research Associate **Oleh Smutok**
 Department of Chemistry & Biomolecular Science, Clarkson University
 8 Clarkson Avenue, Box 5810, Potsdam, New York 13699-5810, USA
 Tel.: 1-315-244-9801, E-mail: osmutok@clarkson.edu
 Web site: <https://www.clarkson.edu/people/oleh-smutok>

by this letter I confirm that scientific results of Assoc.Prof., Ph.D. Rusyn Iryny Bohdanivny (Department of Ecology and Sustainable Environmental Management, Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development, Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine) listed below and described in her Doctoral Thesis were accepted for researching at the Department of Chemistry & Biomolecular Science, Clarkson University (Potsdam, New York, USA). The developed by Rusyn I.B. approaches focused on green bioelectricity based on usage of biotechnological systems as sources of renewable energy are applied for scientific work of the Department. The presented results are also useful for the educational process of students and graduate students at the Department.

Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2020). Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(1), 20-31. doi:10.5755/j01.erem.76.1.22212

Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2019). Bioelectricity production in an indoor plant-microbial biotechnological system with *Alisma plantago-aquatica*. *Acta Biologica Szegediensis*, 62(2), 170-179. doi:10.14232/abs.2018.2.170-179

Rusyn, I. B., & Valko, B. T. (2019). Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as a mini bioelectrical systems in a modern buildings. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 20(3), 211-219. doi:10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674

Rusyn, I. B., Vakuliuk, V. V., & Burian, O. V. (2019). Prospects of use of *Caltha palustris* in soil plant-microbial eco-electrical biotechnology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(2), 233-38. doi:10.15421/021935

Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2019). Use of *Carex hirta* in electro-biotechnological systems on green roofs. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 10(1), 39-44. doi:10.15421/021906.

October 27, 2020

PhD, DrSci, Senior Research Associate **Oleh Smutok**

DS-062-15-2020

IMPLEMENTATION

of the scientific research of Assoc. Prof., PhD Iryna Bohdanivna Rusyn
at the Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin, Poland

We confirm that scientific results described in the listed below paper and the Doctoral Thesis of I.B. Rusyn from the Department of Ecology and Sustainable Environmental Management, Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development, Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine:

Rusyn I., Medvediev O., Valko B., Nikitchuk S. (2020). Bioelektryka ekosystem lisiv, zabolochenykh luk ta ahroekosystem Zakhidnoi Ukrainy [Bioelectricity of forest ecosystems, wetland meadows and agroecosystems of Western Ukraine]. *Naukovi Pratsi Lisivnychoi Akademii Nauk Ukrainy* 20, 33-44. <https://doi.org/10.15421/412003>

were applied for research projects of the Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin, Poland. The presented scientific results developing from monitoring the bioelectric parameters of crop agroecosystems and fruit agroecosystems were used for the development of agrophysical basis for limiting losses and improving the quality characteristics of fruit and modelling the energy exchange in soil-plant-atmosphere system at the Institute.



DYREKTOR

Stawiński

prof. dr hab. Cezary Sławiński,

czł. koresp. PAN

Professor Cezary Sławiński,

corresponding member of the Polish Academy of Sciences

Director of the Institute of Agrophysics, PAS



**INSTITUTE OF
MACROMOLECULAR
CHEMISTRY**
CZECH ACADEMY OF SCIENCES

Prague, January 26, 2021

PRACTICAL SIGNIFICANCE AND APPLICATION

of Doctoral Thesis of Assoc. Prof., PhD Rusyn Iryna Bohdanivna

at Department of Polymer Particles,

Center of Biomacromolecular and Bioanalogous Systems,

Institute of Macromolecular Chemistry of the Academy of Sciences

of the Czech Republic, Prague

We confirm that scientific results represented in Doctoral Thesis and in listed below articles of Rusyn I.B., Associate Professor of Department of Ecology and Sustainable Environmental Management, Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development at Lviv Polytechnic National University (12 Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine) contain new approaches of bioelectricity generation and have an important practical value to overcome current problems of abiotic fuel cells, ion battery applications and were implemented in scientific projects of Department of Polymer Particles, Center of Biomacromolecular and Bioanalogous Systems. The revealed principles of multi-electrode plant-microbial fuel cells operation and electrode materials proposed by Rusyn I.B. were used at our Department for scientific work, dealing with problems of conductivity and battery electrolytes, design and preparation of inorganic (e.g. metal, their oxides and fluorides) nanoparticles with a low carbon footprint.

Rusyn I.B., Valko B.T. (2019) Container landscaping with *Festuca arundinaceae* as bioelectrical minisystems in modern buildings. IJECE 20(3):211-229. doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026674

Rusyn I.B., Hamkalo K.R. (2020) Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. EREM 76(1):20-31. doi: 10.5755/j01.ere.76.1.22212

Rusyn I.B., Medvediev O.V., Valko B.T. (2021) Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant-microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. In press Int. J. Environ. Sci. Tech.

Research fellow, PhD Patsula Vitalii

INSTITUTE OF MACROMOLECULAR CHEMISTRY, CZECH ACADEMY OF SCIENCES

Heyrovského nám. 2, 162 06 Prague 6, Czech Republic, tel.: +420 296 809 111, e-mail: office@imc.cas.cz, www.imc.cas.cz



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes

CONFIRMATION OF RESULTS IMPLEMENTATION

We confirm that the scientific results of Assoc. Prof., Ph.D. Rusyn Iryny Bohdanivny from Department of Ecology and Sustainable Environmental Management, Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development, Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine, which presented in her Doctoral Thesis and described in listed below articles were implemented for research projects at the Technology Institute of El Llano Aguascalientes (ITEL), National Technology Institute of Mexico (TecNM). The developed by Rusyn I.B. approaches in the study of plant microbial electro-biosystems as sources of renewable energy are used for scientific work of the Institute for the development of plant bio-battery.

Rusyn I.B. Role of microbial community and plant species in performance of plant microbial fuel cells (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111697 (19p). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111697>

Rusyn I.B., Medvediev O.V., Valko B.T. (2021). Enhancement of bioelectric parameters of multi- electrode plant–microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(6), 1323 – 1334. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02934-3>.

Rusyn, I. B., & Hamkalo, Kh. R. (2020). Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76 (1), 20 – 31. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.1.22212>

We much appreciate her scientific contributions towards Bio-electrochemical energy generation systems.

Sincerely,

Dr. SATHISH-KUMAR KAMARAJ

Profesor Investigador, Titular 'A',

Departamento de Ingeniería,

Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL) TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO (TecNM)

Km. 18 Carretera Ags.-S.L.P., El Llano Aguascalientes, C.P. 20330.Mexico.

Проректор

за науково-педагогічної роботи

Національного університету

«Львівська політехніка»

Давидчак О.Р.

«___» _____ 2023



АКТ

про використання у навчальному процесі
Національного університету «Львівська політехніка»
результатів досліджень та розробок, одержаних
при виконанні дисертаційної роботи
«Біотехнологічні основи отримання електрики
у рослинно-мікробних біосистемах»
Русин Ірини Богданівни

Комісія у складі:

- голова науково-методичної ради ІСТР ім. В'ячеслава Чорновола к.е.н., доц. Данько Т.І.;
- зав. каф. ЕЗП д.т.н., проф. Мальований М.С.
- д.т.н., проф. Сабадаш В.В.
- д.т.н., проф. Дячок В.В.

цим актом підтверджує, що основні положення дисертаційної роботи Русин Ірини Богданівни «Біотехнологічні основи отримання електрики у рослинно-мікробних біосистемах», поданої на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук за спеціальністю 03.00.20 – Біотехнологія використані:

1. У програмі лекційного курсу «Біотехнологія» у темі «Біопаливо», оскільки отримані результати стосуються альтернативних методів генерації біоелектрики за допомогою рослинно-мікробного паливного елементу.
2. У програмі лекційного курсу «Біологія» у темі «Біотехнологія в енергетиці. Біологічне вирішення екологічних проблем в енергетичній галузі», оскільки результати стосуються отримання біоелектрики з ґрунту, де розвиваються рослини та пов'язані з ними ризосферні мікроорганізми, а метод отримання енергії базується на біохімічній взаємодії рослин та мікроорганізмів для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» усіх форм навчання.

Голова НМР ІСТР

к.е.н., доц.

Члени комісії:

зав. каф. ЕЗП д.т.н., проф.

д.т.н., проф.

д.т.н., проф.

Данько Т.І.

Мальований М.С.

Сабадаш В.В.

Дячок В.В.