

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**РУСИН ІРИНА БОГДАНІВНА**



УДК 606:621.3: 620.951/952:574.46

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

03.00.20 – біотехнологія

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора біологічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська Політехніка» Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**ДЯЧОК Василь Володимирович**  
професор кафедри екології  
та збалансованого природокористування  
Національного університету «Львівська Політехніка»

**Опоненти:** доктор технічних наук /біотехнологія/, професор,  
**СТАБНИКОВ Віктор Петрович**  
завідувач кафедри біотехнології і мікробіології  
Національного університету харчових технологій,  
м.Київ

доктор біологічних наук, професор  
**БАЙЛЯК Марія Михайлівна,**  
завідувач кафедри біохімії та біотехнології  
Прикарпатського національного університету  
імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ

доктор біологічних наук, професор  
**АНТОНЯК Галина Леонідівна,**  
професор кафедри екології  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка, м. Львів

Захист відбудеться «29» вересня 2023 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Берестейський 37, корпус 1, ауд. 05.

З дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://ela.kpi.ua> та у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Берестейський 37.

Реферат розісланий «21» серпня 2023 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28  
доктор технічних наук, доцент



Наталія ГОЛУБ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розробка альтернативних, екологічно безпечних та енергоефективних біотехнологій, яким присвячена дисертаційна робота, є одним з пріоритетних завдань сучасного суспільства. Результатом використання традиційних джерел енергії є масштабне забруднення атмосфери, ґрунтів, водойм, продуктів харчування та глобальна зміна клімату. За даними Міжурядової групи експертів ООН зі зміни клімату, глобальне потепління може спричинити підйом рівня води та затоплення місць проживання 280 млн. людей, інтенсифікацію руйнівних ураганів і лісових пожеж та аномальну спеку (за підвищення температури на 2–3°C до 2100 року).

Забруднене середовище та надзвичайна кліматична ситуація зумовлюють потребу пошуку нових екологічно чистих енергоефективних технологій із зменшенням викидів парникових газів. В рамках переходу до стратегії вуглець-нейтральності до 2050 р., який задекларували низка європейських країн, вагома роль надається альтернативним джерелам енергії та озелененню. Зелені біотехнології є важливим способом подолання причин і наслідків глобальної зміни клімату, а також ресурсозберігаючим чинником. У планах розвитку міст закладаються нові екологічні принципи із впровадженням енергоефективних будинків, зокрема із зеленими дахами, а існуючі міста та агломерації підлягають зеленій модернізації.

Рослинно-мікробні біосистеми є інноваційним екологічним способом отримання біоелектрики, яку продукують мікроорганізми прикореневої зони за внесення електродних систем у субстрат росту рослин. Проте, натепер отримання рослинно-мікробної біоелектрики є недостатньо досліджене. Вивчення рослинно-мікробних біосистем, так званих рослинно-мікробних паливних елементів, було розпочато в 2008 році на полях з *Oryza sativa* (De Schamphelaire et al., 2008, Kaku et al., 2008), в лабораторії з болотною травою *Glyceria maxima* (Strik et al., 2008) та продовжено на зелених дахах в 2010 році з рослинами *Spartina anglica* (Helder et al., 2010, Timmers et al., 2010). Але, було показано зниження ефективності генерації біоелектрики в зимовий період. Розраховано практичний потенціал рослинно-мікробної біотехнології: за вдосконалення 100 м<sup>2</sup> фітоценозів із вмонтованими електродами можуть забезпечити енергопотреби цілого будинку, що споживає 2800 кВт\*год/рік (Strik et al., 2011). Однак, теоретичного максимуму потужності поки що не досягнуто. Натепер рослинно-мікробні біосистеми 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 застосування біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики: недостатня ефективність, висока вартість матеріалів, залежність виходу від сезону. Крім цього, існуючі прототипи є досить громіздкими (Pamintuan et al., 2020, Arulmani et al., 2021, Apollon et al., 2022). Завдання підвищення ефективності біосистем є складним і залежить від низки чинників: біологічних (розвитку кореневої системи, фотосинтетичної активності, ризодепозиту рослин, електрогенезу мікроорганізмів та активності ґрунтових біонтів), технічних (складу і структури субстрату, матеріалів

електродів, схем їх розташування), а також впливу зовнішніх чинників (температури, вологості, освітлення).

У зв'язку із вищезазначеним розвиток інноваційних біотехнологій екологічно безпечної рослинно-мікробної біоелектрики є актуальним і практично вагомим.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація є частиною науково-дослідних тематик кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська Політехніка», що здійснені 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.

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

Для досягнення поставленої 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 анелід *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 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.

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

**Методи дослідження.** При вивченні рослинно-мікробних біосистем використовувалися біометричні, гравіметричні, фотометричні,

рентгенофлюорисцентні, потенціокондуктометричні методи, вольтамперометрія при коротко- та довготривалому застосуванні зовнішніх резисторів, аналіз метеорологічних архівних даних та методи статистичного аналізу.

**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 (light emitting diodes) 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, жити 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** для LED освітлення та для живлення цифрових термометрів/гігрометрів при озелененні енергоефективних будинків ТзОВ «ГАЛИЦЬКА БУДІВЕЛЬНА ГІЛЬДІЯ» і ПП «Укртексколор» у житлових комплексах «Park Tower» та «ПАРУС СІТІ» у м. Львові.

Розроблені біотехнології застосовані в наукових проектах європейських і 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.

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

**Особистий внесок здобувача.** Дисертантці належить ідея досліджень і планування напрямків досліджень. Всі експерименти виконувались здобувачем особисто або за безпосередньої участі із співавторами статей. Визначення вмісту важких металів у ґрунтових пробах було проведено у співробітництві з старшим викладачем кафедри екологічної безпеки та природоохоронної 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.** 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); Miedzynarodowa konferencja naukowa i praktyczna «Aktualne problemy ochrony srodowiska Ukrainsko-Polskiej strefy przygranicznej» (Lviv, 2019); International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application» (Dubai, UAE, 2014); 1st International Academic Congress «Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Oceans Countries» (Tokyo, Japan, 2014); V Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (Вінниця, 2015); 3-ому міжнародному конгресі «Environment protection. Energy saving. Sustainable environmental management» (Львів, 2014); X Міжнародній науково-практичній конференції «Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання» (19-21 травня 2011, Львів); III, VI, VIII, IX Міжнародній науковій конференції молодих науковців «Біологія: від молекули до біосфери» (Харків, 2008, 2011, 2013, 2014); III-VI, X, XI Міжнародній науковій конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології» (Львів, 2007-2010, 2014, 2015); III Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Біотехнологія: звершення та надії» (Київ, 2014); II Міжнародній науковій конференції студентів, магістрантів, аспірантів та молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансованого користування» (Харків, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2010); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Біотехнологія. Наука. Освіта. Практика» (Дніпропетровськ, 2008); International Conference for Students of Nature Sciences «The Coins 2008» (Vilnius, 2008); Міжнародній науково-практичній конференції студентів і аспірантів та молодих вчених (Київ, 2008); International scientific conference of young scientists and students «Modern Problems of Microbiology and Biotechnology» (Odessa, 2007).

**Публікації результатів досліджень.** 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: Нідерландів, 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 у 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.

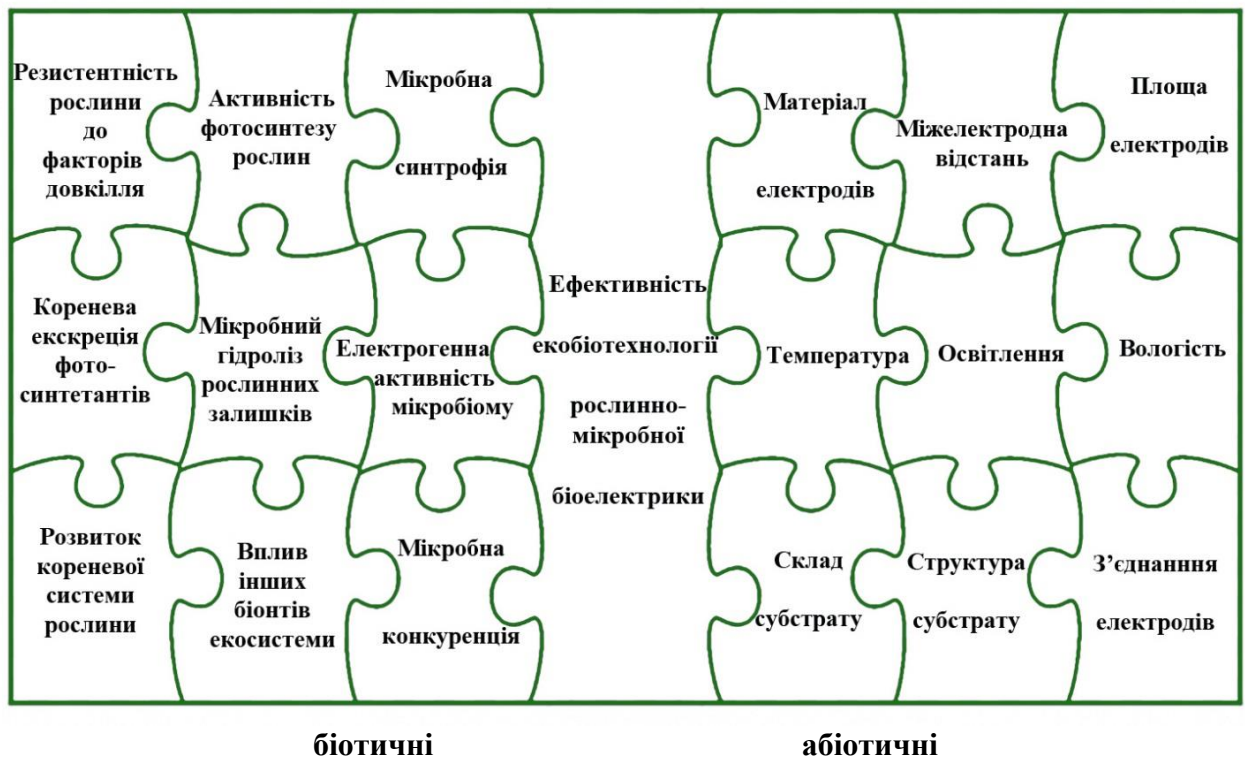
**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 491 сторінках друкованого тексту та включає вступ, огляд літератури, опис матеріалів і методів досліджень, 7 розділів результатів власних досліджень, висновки, список використаних літературних джерел, а також, додатки. Дисертація ілюстрована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



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення, апробацію отриманих результатів, наведено кількість публікацій і обсяг дисертації.

У **першому розділі** розкрито основні біоелектрохімічні принципи біотехнології отримання рослинно-мікробної біоелектрики та основні сфери додаткового її застосування, проаналізовано низку біологічних, технічних та зовнішніх чинників від яких залежить робота біосистем (рис. 1) та проведено дослідження сучасного стану проблеми.



**Рис 1.** Біологічні, технологічні та чинники довкілля, які впливають на функціонування рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики

Проведено аналіз використовуваних в галузі електродних матеріалів та конфігурацій електродних систем, а також, синтетичних та натуральних субстратів рослинно-мікробних біосистем як важливих факторів продуктивності біоелектрики. Проаналізовано роль мікробних консорціумів та рослин як основних рушіїв біотехнології отримання біоелектрики. Розглянуто видове різноманіття електро-активних мікроорганізмів, роль в електрогенезі анодних мікроорганізмів, біокатоду та мікроорганізмів міжелектродного простору, а також, значення для генерації біоелектрики синтрофії та конкуренції між мікроорганізмами. Висвітлено роль фотосинтезу, кореневої екскреції та гідролізу рослинних залишків, виду рослин та їх фотосинтетичного шляху для функціонування біоелектричних систем. Вияснено вплив зовнішніх факторів на



отримання біоелектрики. Здійснено аналіз рослинно-мікробних паливних елементів на основі різних видів рослин як джерела електрики для живлення низькоенергоспоживаючих приладів, а також, біосенсорування, ремедіації стічних вод та забруднених водойм, ґрунтів та повітря, створення зелених дахів і джерел живлення людини і тварин, та їх глобальне значення в кліматорегуляції та редукції парникових газів.

У **другому розділі** описано розроблені рослинно-мікробні біосистеми генерації біоелектрики, умови експериментів в будинках та *in situ* і методику досліджень.

Експерименти в будинках проводили в місті Львові у житлових будинках та в навчальних корпусах Національного університету «Львівська політехніка» на плоских дахах, терасах, балконах і всередині приміщень, а також *in situ*. Об'єктом досліджень в будинках була генерація біоелектрики біосистем з більше як 15 видами рослин: 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., левкобриєм сизим *Leucobryum glaucum*, а також, з кімнатними рослинами: базиліком кімнатним *Ocimum basilicum*, солейролією гелксиною *Helcine soleirolii*, плющем звичайним *Hedera helix* L., кімнатною пальмою *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. та ряскою малою *Lemna minor*.

Експерименти *in situ* проводили у лісах, заболочених луках та сільсько-господарських угіддях Волинського Полісся, Львівського Опілля і в Карпатах. А саме: в с. Волощина (Перемишлянський район, Львівська обл.), с. Прилісне (Маневицький район, Волинська обл.), с. Кульчин (Турійський район, Волинська обл.) та у високогірному с. Кривопілля (Верховинський район, Івано-Франківська обл.), а також в паркових урбоекосистемах міста Львова і екосистемах газонних трав розділяючих смуг вздовж міських автотрас з різним ступенем забруднення.

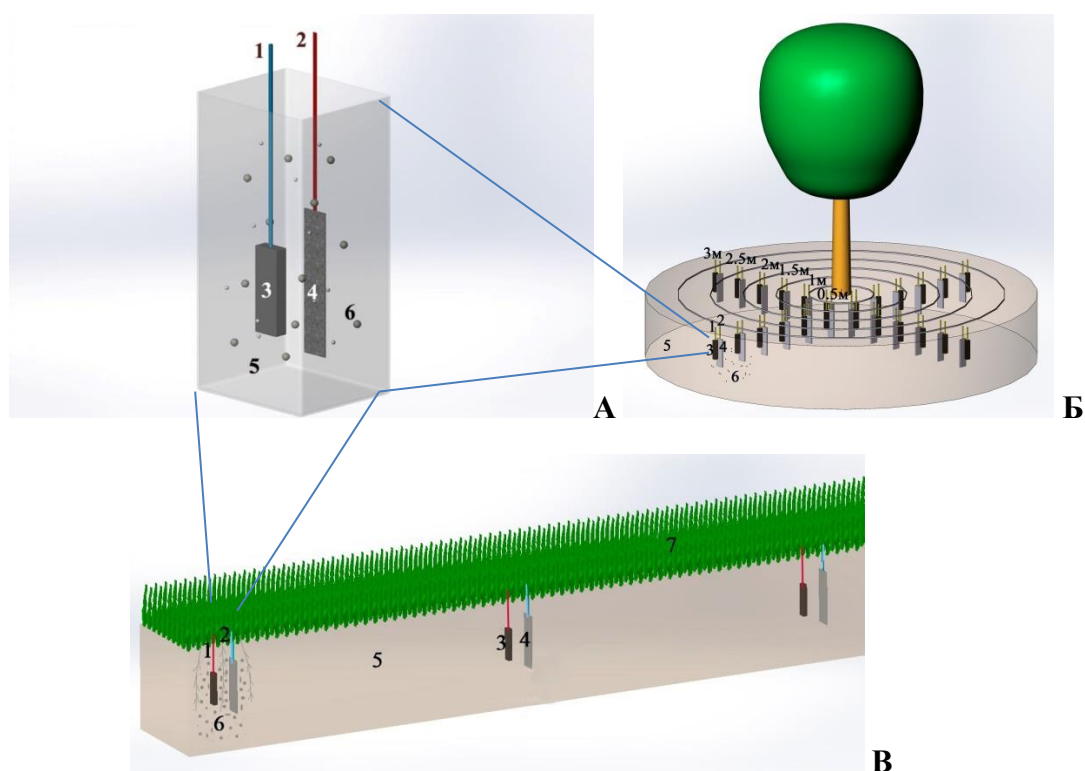
В експериментах *in situ* об'єктом дослідження була генерація біоелектрики біотопів 45-ти видів рослин, найбільш широко представлених на заході України. Біоелектрика генерувалася при взаємодії угруповання рослин і їх ризосферних мікроорганізмів (фітомікробоценозів). В лісових екосистемах досліджували генерацію біоелектрики фітомікробоценозами, сформованими переважаючими в лісах України видами рослин, такими як сосна лісова *Pinus silvestris* L., дуб звичайний *Quercus robur* L., а також, бук лісовий *Fagus sylvatica* L., береза повисла *Betula pendula* Roth., вільха чорна *Alnus glutinosa* (L.) Gaerth. та граб звичайний *Carpinus betulus* L. В екосистемах заболочених луків вивчали генерацію біоелектрики фітомікробоценозів осоки шершавої *Carex hirta* L., осоки трясуководної *Carex brizoides* L., кути озерної *Scirpus lacustris* L., тонконога болотяного *Poa palustris* L. та калюжниці болотяної *Caltha palustris* L.

Об'єктом досліджень в агроекосистемах була генерація біоелектрики типових фітомікробіоценозів фруктових садів, таких як плодівих 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 агрокультур: 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 фітомікробіоценозів 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 фітомікробіоценозів 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. Вимірювання біоелектричних показників проводилося з 30 – 50 зразками кожного виду *in situ*.

Для вивчення генерації біоелектрики були розроблені нові пари електродів, які склалися з графітових катодів та оцинкованих сталевих анодів з перфораціями та на їх базі двоелектродні та багатоелектродні системи. Для моніторингу за показниками біоелектрики природних біотопів екосистем конструювали двоелектродні системи з графітових, алюмінієвих, мідних матеріалів, нержавіючої та оцинкованої сталі, застосовуючи перфорування для збільшення робочої площі електрода. В якості дротів використовували мідні дроти з полівінілхлоридною ізоляцією, які з'єднували з електродами механічно, запаюванням олов'яним сплавом чи за допомогою додаткових кріпильних елементів для уникнення втрат провідності.

Двоелектродні системи (рис. 2) розміщували стаціонарно у ґрунті протягом експерименту з міжелектродною відстанню 0.01 – 0.1 м на глибині 0.05 – 0.3 м в товщі ґрунту, де зосереджена основна маса кореневої системи як дерев, так і трав, на відстані 0.5 – 3.0 м від стовбура дерева чи та на відстані 0.15 м від стебла рослин в декількох напрямках від рослини через можливу кореневу асиметрію.

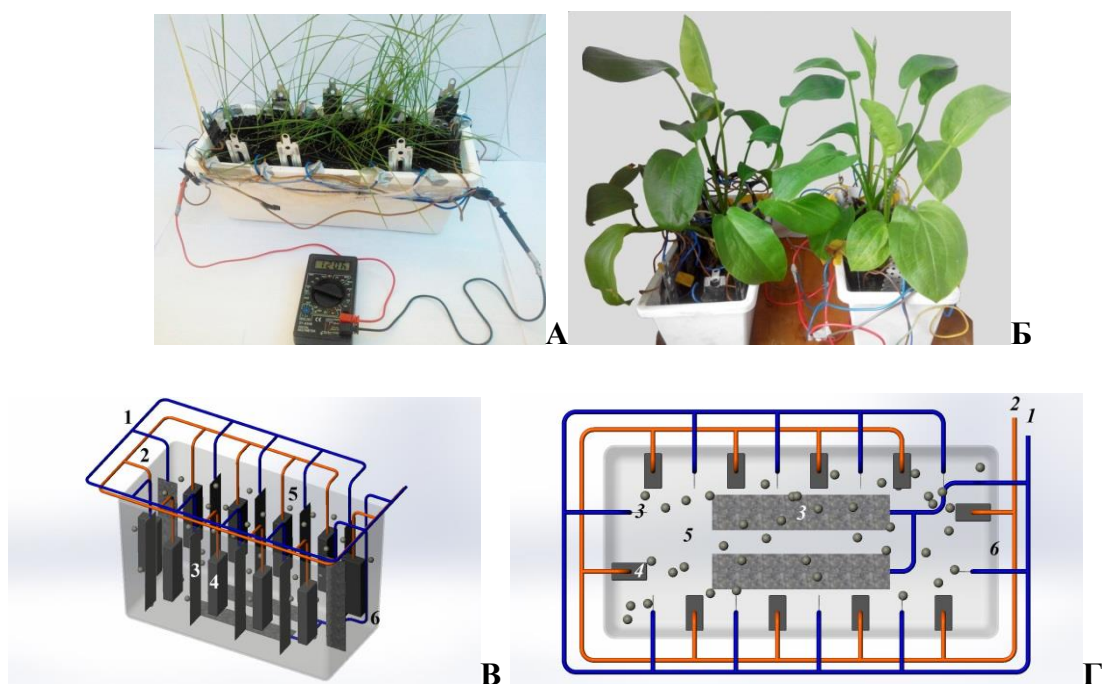


**Рис. 2** Схематичне представлення двоелектродної системи та її розміщення в товщі ґрунту

- (А) загальна схема, (Б) розміщення довкола дерева в 4ох напрямках на відстані 0.5 – 3 м від стовбура дерева і на глибині 0.05 – 0.3 м в ґрунтовому горизонті, (В) в зоні кореневої системи газонних трав на глибині 0.05 – 0.3 м:  
 1 – вихід дроту, що з'єднує катод; 2 – вихід дроту, що з'єднує анод; 3 – катод;  
 4 – анод; 5 – субстрат; 6 – ґрунтові електроактивні мікроорганізми; 7 – рослина

Для створення рослинно-мікробних біосистем використовували сукупність біологічних та технологічних компонентів: в пластикові контейнери у середовище для розвитку рослин поміщали електродні системи та вносили насіння чи висаджували саджанці рослин. Субстратом був обраний універсальний ґрунтовий субстрат Esoflora, оптимальний для розвитку більшості рослин, 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. Для вирощування болотистих рослин співвідношення субстрату і води становило 2:1.

Для конструювання багатоелектродних біосистем декілька графітових катодів з'єднували між собою паралельно мідними дротами у систему катодів та декілька оцинкованих сталевих анодів з перфораціями у систему анодів (рис. 3). Багатоелектродні системи склалися з різних комбінацій кількості катодів від 2 до 12 та анодів від 2 до 12. Експерименти проводили із 10-ма біосистемами кожного типу. Електродні системи зосереджували в зоні асоціації коріння рослин та ризосферних мікроорганізмів, де відбувається емісія електронів та протонів. Дроти від електродних систем виводили назвні з ґрунтової поверхні та під'єднували до навантаження та мультиметра.



**Рис. 3** Схематичне зображення біосистем, базованих на (А) *Festuca arundinacea* і (Б) *Alisma plantago-aquatica* та розташування в них систем електродів (В) фронтальний вигляд, (Г) вигляд згори: 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.

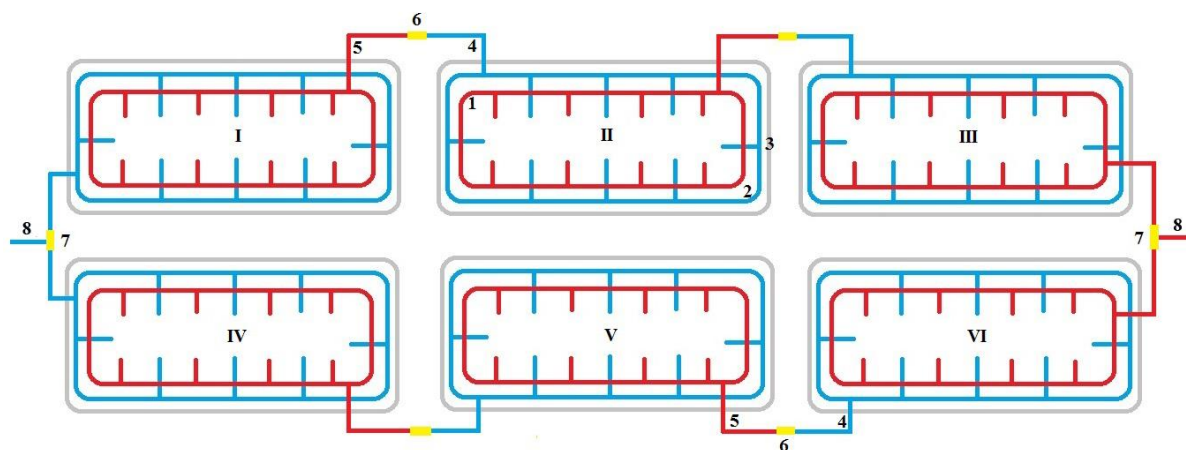
В якості біологічних енхансерів функціонування біосистем було досліджено бактерії *Desulfovibrio* sp. Yav-6 та анеліди *Lumbricus terrestris* L. Для розробки комплексів біосистем було застосоване стекування багатоелектродних біосистем шляхом комбінацій їх паралельного та послідовного з'єднання. Одна з таких комбінацій представлена на рис. 4. Комплекс біосистем був сформований з шести однакових біомодулів з 8 катодів/8 анодів у складі кожного, використовуючи і паралельне, і послідовне їх з'єднання. Біосистеми I – III та IV – VI були поєднані послідовно і далі з'єднані паралельно в один комплекс (рис. 4).

Параметри рослин визначали біометрично та гравіметрично. Висоту рослин було встановлено біометрично шляхом вимірювання наземної частини рослини до верхівки рослини. 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 °С та зважений. Накопичення листово-стеблової та кореневої маси на одиниці площі було обчислено як загальну суху масу на загальну площу, вкриту рослинами. Для кожного визначення використовували три зразки кожного виду, які були подрібнені до стану порошку.

Інокулят *Desulfovibrio* sp. Yav-6 отримували в результаті культивування бактерій в середовищі Кравцова-Сорокіна з сульфатами у пробірках об'ємом 25 мл, доверху заповнених середовищем і щільно закритих гумовими корками при

30 °C упродовж 10 діб. Біомасу клітин визначали ваговим та нефелометричним методами.

Вимірювання біоелектричних параметрів біосистем проводили в умовах як відкритого кола (OCV, Open Circuit Voltage), так і під навантаженням від 10  $\Omega$  до 12 к $\Omega$ . Поляризаційний аналіз здійснювали із застосуванням короточасного під'єднання резисторів. Крім цього, проводили довготривалі експерименти з під'єднанням резистора 500  $\Omega$ , 1 к $\Omega$ , 3 к $\Omega$  та 5 к $\Omega$  протягом кількох діб. Визначення біоелектричних параметрів здійснювали за допомогою цифрового мультиметра UT890C UNIT-T, щупи якого під'єднували до виходів дротів від системи катодів та системи анодів. Біоелектричні показники визначали щоденно та обраховували їх середні значення. Сила струму визначали при навантаженні 10  $\Omega$  чи обраховували з експериментально визначених напруги і опору за законом Ома. Густина сили струму та потужності з однієї біосистеми нормалізували до 1 м<sup>2</sup> площі експериментальної ділянки, вкритої електродами та рослинами (Plant Growth Area, PGA).



**Рис. 4** Схематичне зображення комплексу багатоелектродних біосистем:

1 – катодна система; 2 – анодна система; 3 – 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; 8 – вихід дроту до резистора

Моніторинг фізико-хімічних чинників довкілля та метеорологічних факторів, що впливали на досліджувані фітомікробоценози проводили наступним чином. Забруднення ґрунту важкими металами визначали за допомогою рентгенофлуорисцентного аналізу. Вологість ґрунту та освітлення ділянки визначали потенціокондуктометрично і фотометрично. Розрахунок середньодобових та середньотижневих температур довкілля та кількості опадів здійснювали за допомогою обробки метеорологічних даних архіву метеостанцій [gr5.ua](http://gr5.ua).

Результати представлені як середнє значення всіх повторюваних експериментів та їх стандартних похибок ( $x \pm SE$ ). Істотність різниці середніх значень було встановлено за допомогою однібічного аналізу та F-тесту для рівня достовірності 95%. Ступінь залежності між показниками встановлювали за

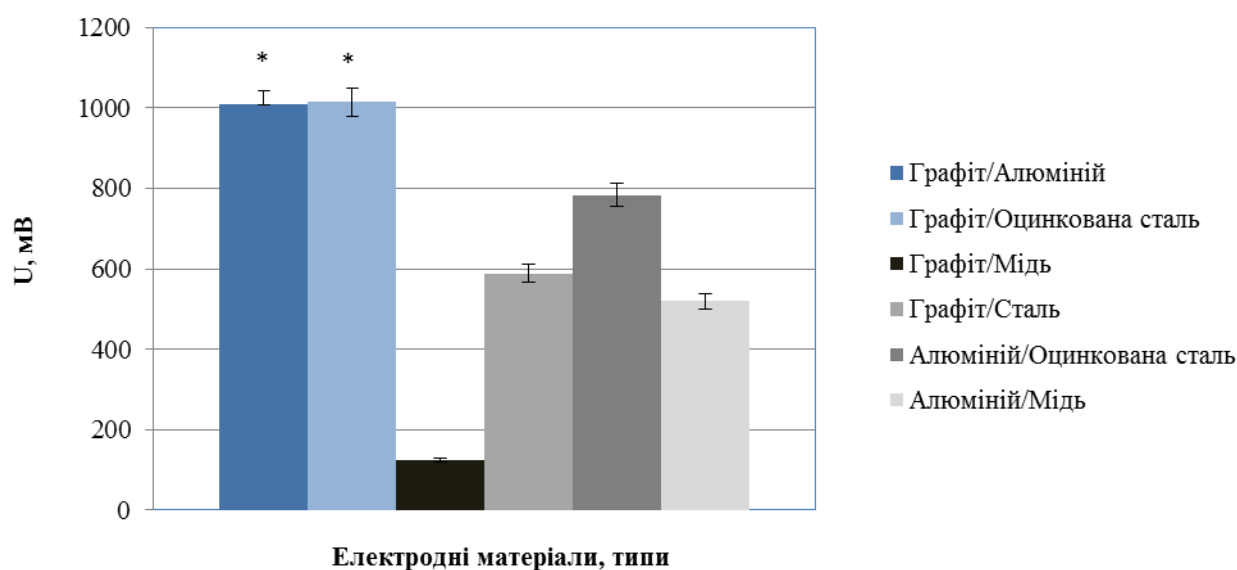


допомогою коефіцієнту кореляції Пірсона. Значущість кореляції вважалася високою при значенні коефіцієнту більше 0.5.

**В третьому – дев'ятому розділах** представлено результати та обговорення власних досліджень розроблених біосистем генерації біоелектрики всередині будинків, на зелених дахах та в природних біотопах *in situ* при дії різних біологічних і технологічних агентів та факторів середовища.

### Розробка структури біосистем з нових матеріалів та їх ефективність

Традиційними електродами для рослинно-мікробних біосистем є вуглець базовані матеріали, проте середня густина потужності базованих на них біосистем є невеликою, в той час, як їх вартість нерідко є високою, як наприклад, гранульованого активованого карбону. Некономічними є також і золоті дроти чи тефлоном вкриті мідні дроти для з'єднання електродів. Використання в біосистемах комбінації карбонових і некарбонових електродних матеріалів лише починає досліджуватись і представляє значний інтерес. Тому нами було проаналізовано різні альтернативні матеріали для електродів, як в лабораторних експериментах з кімнатними рослинами, так і *in situ* із лісовими і садовими рослинами для вибору нових оптимальних матеріалів (рис. 5).

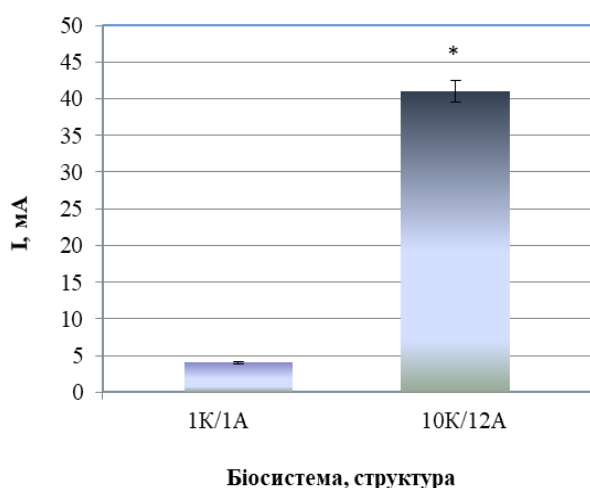


**Рис. 5** Залежність напруги біосистем від матеріалів електродів ( $x \pm SE$ ,  $n=10$ ),  
\* ( $P < 0.05$ )

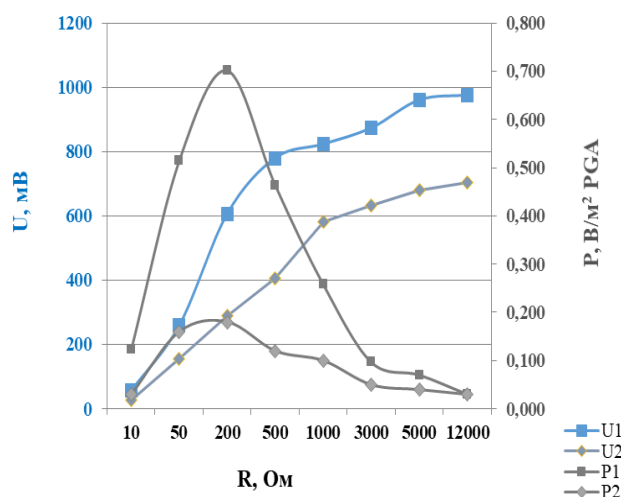
Графітові палички як катоди та перфоровані оцинковані сталеві плити і алюмінієві аноди були ефективніші в 1.29–8.12 раз в порівнянні з іншими. Напруга, зареєстрована парами електродів графіт-оцинкована сталь та графіт-алюміній суттєво перевищувала показники, отримувані іншими парами електродів ( $P < 0.05$ ). Тому графіт-оцинковані сталеві електроди були обрані для біотехнології рослинно-мікробних біосистем, як і завдяки їх економічній доступності (0.050 EUR за 1 катод площею 0.009 м<sup>2</sup>), так і стійкості до чинників довкілля. Оцинкована поверхня сталі захищає електрод від корозії, а електрод на

його основі відносно недорогий (0.025 EUR за 1 анод площею 0.009 м<sup>2</sup>). Використання графітових відходів тролейбусного електротранспорту дозволяє ще більше знизити вартість біотехнології. Розроблено спосіб прямого отримання рослинно-мікробної біоелектрики з ґрунту за допомогою даної пари електродів та мідних дротів з полівінілхлоридною ізоляцією.

Для ефективнішого збору біоелектрики було сконструйовано багатоелектродні системи для одного біомодуля, що є ще одним новим підходом в цій роботі (рис. 3). Збільшення кількості та площі електродів в межах одного біомодуля 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 1000 Ом (рис. 6, 7). Паралельне об'єднання кількох електродів в одній біосистемі мало істотний вплив на силу струму: біоелектрика багатоелектродних біосистем суттєво перевищує таку ж двоелектродних при 10  $\Omega$  ( $P < 0.05$ ). Збільшення поверхні електродів одного біомодуля в 10 разів приводило до збільшення потужності при 200 Ом в 3.95 рази та збільшення сили струму в 10.1 раз при 10 Ом.



**Рис. 6** Вплив збільшення площі електродів на генерацію сили струму біосистем при 10  $\Omega$  ( $x \pm SE$ ,  $n=10$ )  
 1K/1A - двоелектродна біосистема  
 10K/12A - багатоелектродна біосистема  
 \*  $P < 0.05$



**Рис. 7** Біоелектричні параметри багатоелектродної (10K/10A) (1) і двоелектродної (1K/1A) (2) біосистем:  
 U1 і U2 – напруга біосистем (1) і (2);  
 P1 і P2 – густина потужності біосистем (1) і (2).

### Вплив комбінацій паралельного і послідовного з'єднання багатоелектродних біосистем на генерацію біоелектрики

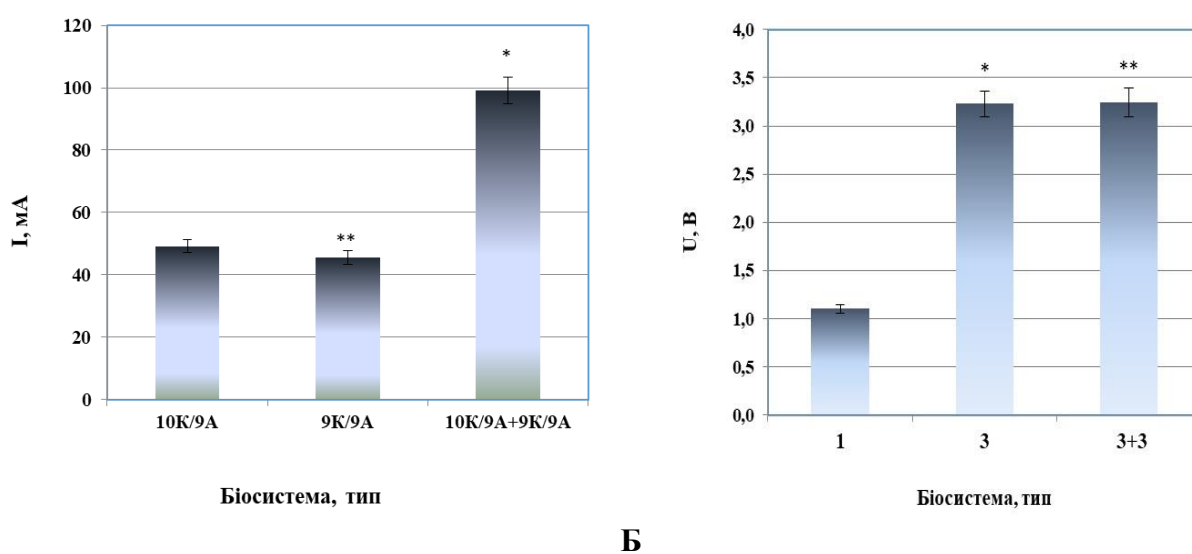
Для вивчення способів підвищення потужності біосистем було досліджено вплив комбінацій паралельного та послідовного з'єднання багатоелектродних біосистем на генерацію біоелектрики. Використання паралельно-послідовного з'єднання на мікробних біосистемах зіштовхнулося з проблемами втрати електроенергії і напруги, як було показано в роботі Oh and Logan, 2006 та Jung



and Pandit, 2019). Даний ефект в рослинно-мікробних системах був недостатньо дослідженим, і тим більше, в багатоелектродних системах.

Було показано, що при паралельному з'єднанні двох багатоелектродних біосистем струм зростає в 2.1 рази (рис. 8А) ( $P < 0.05$ ). Послідовне з'єднання трьох багатоелектродних біосистем приводило до зростання напруги в 2.9 раз (рис. 8Б) ( $P < 0.05$ ). В той час як паралельне з'єднання двох комплексів біосистем із трьох послідовно поєднаних біосистем не приводить до росту напруги ( $P > 0.05$ ).

Таким чином, комбінування різних схем паралельно-послідовного з'єднання багатоелектродних біосистем різних конфігурацій як енергетичних субодиниць в один комплекс є шляхом максимізації отримання рослинно-мікробної біоелектрики.



А

Б

**Рис. 8** Залежність генерації біоелектрики від структури біосистем ( $x \pm SE$ ,  $n=10$ ):

А - Сила струму біосистеми 1 (10К/9А), 2 (9К/9А) та паралельно з'єданого комплексу біосистем 1+2 (10К/9А+9К/9А), 10  $\Omega$ , \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P > 0.05$

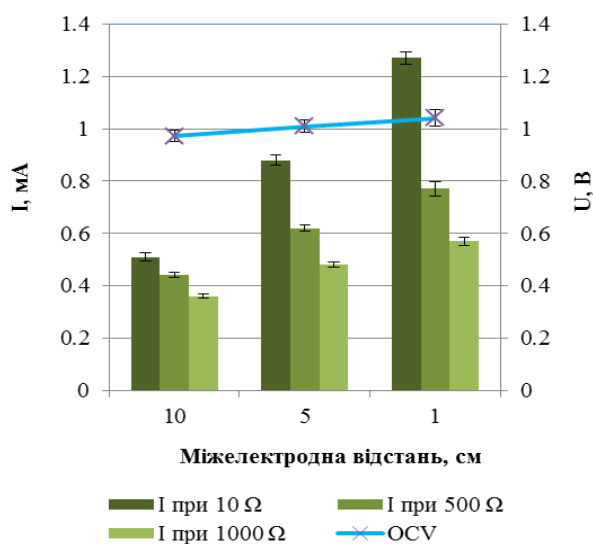
Б – Напруга біосистеми 1 (8К/8А) та послідовно з'єданого комплексу трьох біосистем 3 (8К/8А+8К/8А+8К/8А) і паралельно з'єданого комплексу біосистем 3+3,\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P > 0.05$

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

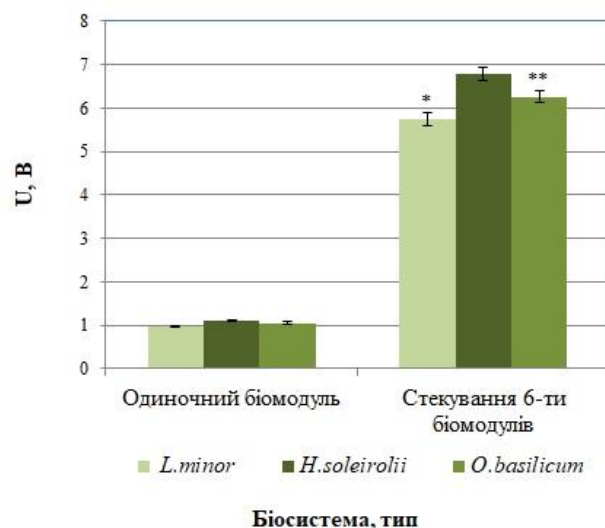
Компактність рослинно-мікробних біосистем є проблемою для їх широкомасштабного використання. Тому, для розробки невеликих компактних біосистем було досліджено вплив зменшення міжелектродної відстані на генерацію біоелектрики, а також, можливість застосування низькорослих видів рослин. Оскільки більшість досліджуваних нами рослин мали кореневу систему мичкувату, тобто без головного кореня, і коріння було рівномірно розподілено в товщі ґрунту, електроди центрувалися відносно стебла рослини.

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 ( $P < 0.05$ ) (рис. 9). А, отже, редукування міжелектродної відстані є ще одним способом максимізації отримання біоелектрики при одночасній реалізації збільшення компактності біосистем.

Біосистема з *H. soleirolii* була ефективнішою від систем з *L. minor* ( $P < 0.05$ ) та *O. basilicum* ( $p=0.952$ ) (рис. 10). Очевидно, *H. soleirolii* володіла більшим ризодепозитом завдяки як своїй багаторічності, так і активно розвинутій кореневій системі в порівнянні з однорічною *O. basilicum* із стрижневим коренем чи багаторічною *L. minor*, але з поодинокими коренями. Послідовне стикування шести модулів з *O. basilicum* та *H. soleirolii* приводило до майже пропорційного зростання напруги до кількості модулів, що зростала в 6.33 раз.



**Рис. 9** Вплив міжелектродної відстані на напругу відкритого кола (OCV) та силу струму (I) біосистеми при короткотривалому навантаженні 10, 500, 1000 Ω ( $x \pm SE$ , n=10)

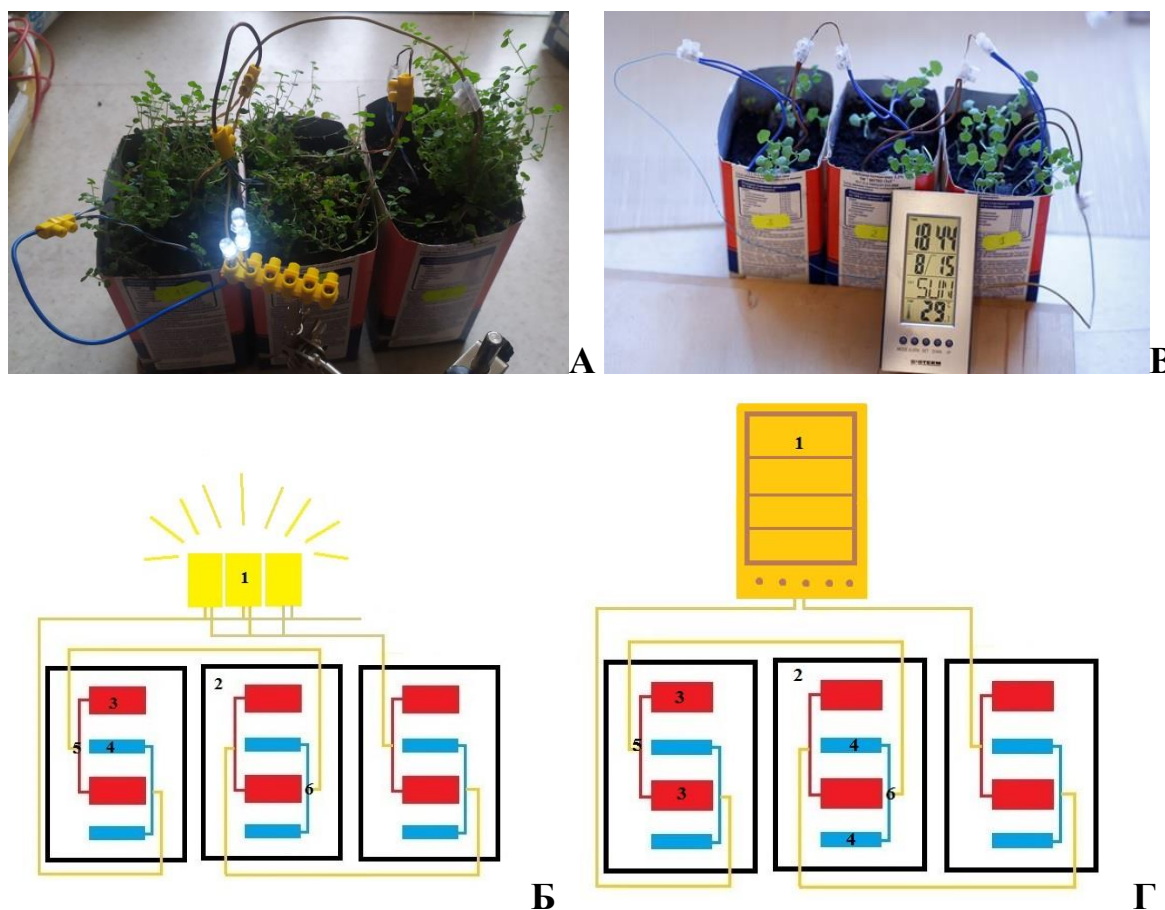


**Рис. 10** Вплив виду рослин та послідовного з'єднання шести біосистем на біоелектричні параметри ( $x \pm SE$ , n=10)

Враховуючи вище виявлені закономірності було сконструйовано ефективний і компактний 4-електродний біомодуль шляхом паралельного з'єднання двох катодів та паралельного з'єднання двох анодів, базований на декоративній рослині *H. soleirolii*, що характеризувався в середньому  $1.02 \pm 0.03$  В в умовах відкритого кола та струмом короткого замикання  $3.79 \pm 0.11$  мА. Такий компактний біомодуль може слугувати як субодинаця для з'єднання та нарощення біоелектричного потенціалу. Тому, на його основі було сконструйовано компактні біосистеми, шляхом послідовного з'єднання біомодулів.

Два такі послідовно з'єднані біосистемні модулі були здатні забезпечувати автономну роботу цифрового годинника чи цифрового термометра/гігмометра

впродовж кількох місяців експерименту в режимі реального часу. Генерована біоелектрика 3-х послідовно з'єднаних біосистемних модулів була достатньою для: 1) безперебійної роботи світлодіодів з напругою живлення 3В; або 2) для автономного і сталого живлення цифрової кімнатної метеостанції, що включала календар, годинник, термометр і таймер впродовж кількох місяців експерименту. Три модулі характеризувалися в середньому  $3.25 \pm 0.09$  В OCV та  $3.80 \pm 0.07$  мА струму короткого замикання та заміняли дві 1.5 В батарейки (рис. 11).



**Рис. 11** Компактна біосистема з рослинами *H. soleirolii* (А, Б) та *O. basilicum* (В, Г) служить автономним джерелом живлення цифрових приладів протягом декількох місяців експерименту:

1 – світлодіоди з паралельним підключенням (Б) чи цифрова метеостанція (Г), 2 – 4-електродний біомодуль, 3 – катод, 4 – анод, 5,6 – послідовне з'єднання паралельно з'єднаних між собою катодів із паралельно з'єднаними між собою анодів різних біомодулів

Можливість функціонування біосистем як автономного джерела біоелектрики в режимі реального часу є їх важливою характеристикою. Як відомо, ряд розроблених у світі біосистем працюють не в режимі реального часу, а заряджають акумулятор на протязі тривалого часу (від кількох годин до кількох діб), щоб прилад пропрацював лише кілька хвилин. Зокрема, як показав Bombelli в 2016 році, акумулятор після 10-ти годин заряджання рослинно-мікробною біоелектрикою міг забезпечувати енергією радіо протягом лише 80 с. Рослинно-мікробна біоелектрика заряджала акумулятор на протязі 3-ох діб, щоб

запасена енергія дозволила частково зарядити мобільний телефон (Gomora-Hernandez et al., 2020).

Розміри багатьох прототипів біосистем є досить громіздкими, і, на жаль, перспективним способом збільшення виходу енергії є підключення кількох біомодулів, що призводить лише до подальшого збільшення габаритних розмірів. Нами вперше досягнуто прогресу в компактності та кількості модулів біосистем при збереженні виходу біоелектрики. Розроблені нами три компактні біомодулі з невеликим об'ємом одного модуля, 0.6 л, та невеликими його габаритами, 12x9.5x5.5 см, генерували біоелектрику на рівні десяти модулів (Bombelli et al., 2016) чи дванадцяти модулів з загальним об'ємом 4.5 л та габаритами одного модуля 32x5x1 см (Apollon et al., 2021). Ще однією перевагою даної роботи є використання дешевших електродних матеріалів та середовищ, на відміну від платинових і вуглецевих тканинних матеріалів та спеціальних середовищ, представлених в інших роботах (табл. 1).

Важливим є вибір рослини для біосистеми як двигуна генерації біоелектрики. Запропонований нами рослинний компонент *H. soleirolii* відрізнявся як більш розвинутою наземною біомасою від низькорослих мохів, сукулентів *Opuntia* чи водяного салату *P. sratotes*, так і більш розвинутою кореневою системою в порівнянні з ризоїдами мохів та невеликою кореневою системою щиріці зеленої *A. viridis* та водяного шпинату *I. aquatica*, використовуваних іншими авторами.

**Таблиця 1** Порівняльна характеристика біосистем генерації біоелектрики, розроблених у світі з представленими в роботі

Кількість модулів	U, V	Параметри модуля, см	Електроди	Рослина	Середовище	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>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. sratotes</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

Встановлено, що рослини з асоційованими ризосферними мікроорганізмами в складі біосистем крім естетичної функції та участі в регуляції кисневого балансу, фільтрації повітря та кулінарного застосування можуть виступати джерелом електроенергії у квартирах чи офісах. Тим більше, сучасні тренди

містобудування забезпечують можливості для цього своїми збільшеними площами віконних поверхонь, зашкленних терас та балконів в будинках, через що інтенсивне природне освітлення сприяє активному розвитку рослин та дозволяє масштабне озеленення помешкань.

Крім *H. soleirolii* та *O. basilicum* для застосування всередині зелених будинків було розроблено дві інші біосистеми з відмінними субстратами: рослиною-гідрофітом водним подорожником *A. plantago-aquatica* і рослиною-мезофітом кострицею очеретяною *F. arundinacea* та заболоченим і універсальним ґрунтовим субстратом, відповідно, як фундамент для розробки біосистем для живлення приладів, що споживають 40 – 100 мА.

### **Генерація біоелектрики біосистемами, базованих на *A. plantago-aquatica* в будинках. Вплив бактерій *Desulfovibrio* sp.**

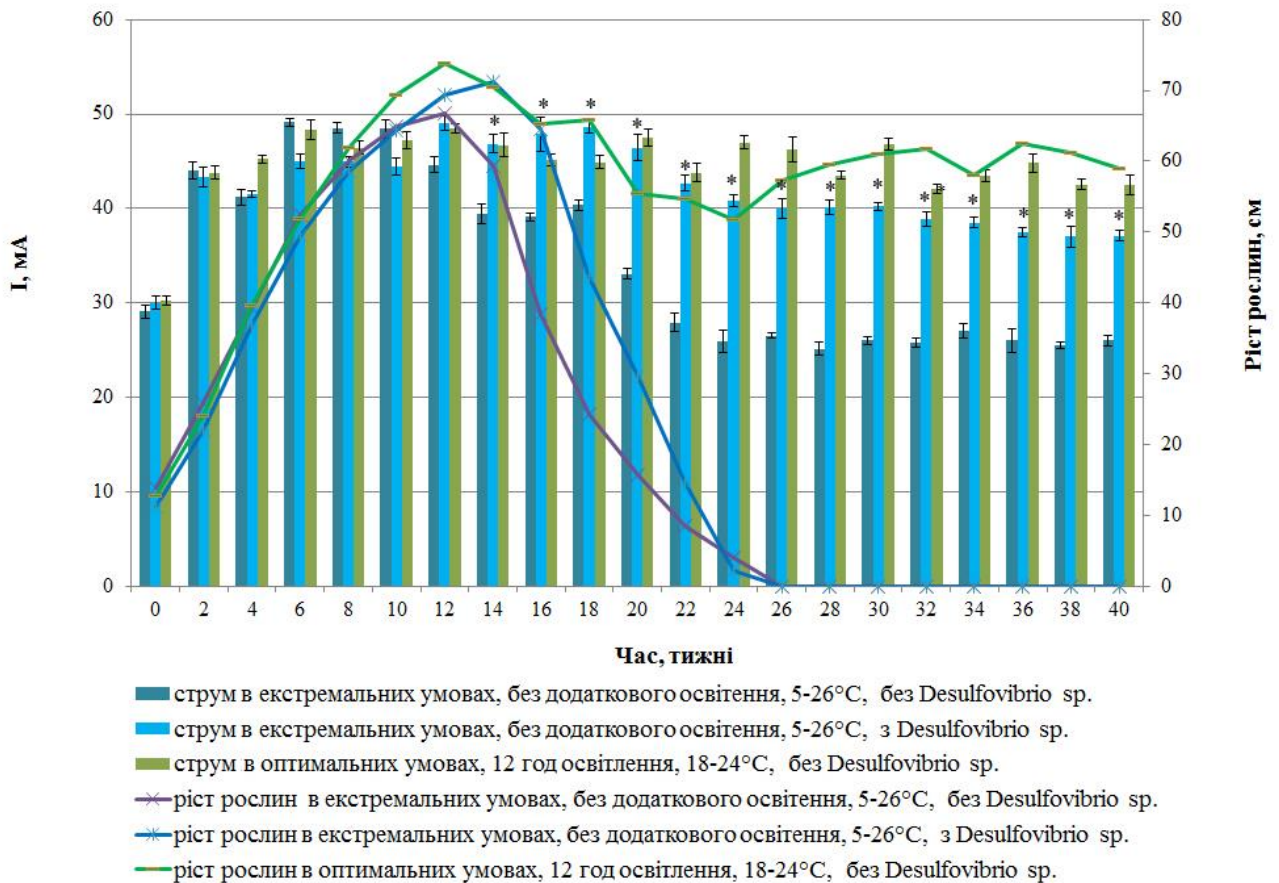
Вибір рослини для електробіотехнології є дуже важливим і визначає, наскільки ефективно вона буде працювати. При використанні однієї і тієї ж біосистеми збору електрики, але з різними рослинами, вихід електроенергії відрізняється до 10 раз, як описано в експериментах Helder M. в 2010 р. Водний подорожник *A. plantago-aquatica* було відібрано для біоелектричної системи через ряд наступних характеристик, таких як: 1) невибагливість рослини, як і сухопутний подорожник, не потребує створення особливих умов зростання та догляду; 2) круглорічний зелений покрив завдяки самосіву на протязі всього літа та проростання молодих кущів з кореневища; 3) багаторічність, розвинуте кореневище та утворення масивної наземної біомаси, до 60 см – 1 м, через що вірогідний високий ризодепозитний потенціал; 4) декоративність рослини, що може виконувати естетичну функцію в будинках; та 5) космополітизм рослини, яка поширена по всіх континентах, що дозволяє застосовувати її у електробіотехнологіях по всьому світу.

Експеримент проводився в різних температурних умовах цілорічно, моделюючи два типи приміщень: 1) неопалювані із зниженням температури в осінньо-зимовий період, аналізуючи можливість отримання біоелектрики на балконах без додаткового утеплення і освітлення; 2) та в оптимальних умовах з постійною температурою і додатковим штучним освітленням. Було виявлено, що генерація біоелектрики біосистемою є достатньо стабільною протягом року в опалюваних приміщеннях з штучним освітленням в зимовий період (тривалість світлового дня 12 годин) при температурі  $21 \pm 3^\circ\text{C}$  і сезонне зниження продукції біоелектрики в цих умовах рівне 8.71% (рис. 12). Цей факт розкриває потенціал внутрішніх приміщень для отримання біоелектрики, незалежно від сезонних особливостей клімату. Відомо, що в умовах зелених дахів рівень біоелектрики знижується майже в 5 разів та спостерігається вимерзання рослин (Helder et al., 2013). Генерація сили струму в заболочених лісах припинялась на тривалий період в зв'язку з сезонними кліматичними особливостями (Dai et al., 2015).

Кореляція росту рослин і генерації біоелектрики висока: коефіцієнт Пірсона складав від 0.67 до 0.96 в залежності від умов. Генерація біоелектрики була найвищою у весняно-літній та початок осіннього періоду, в час найвищої



фотосинтетичної активності рослин. Найвища зафіксована сила струму рівна 58.6 мА. Використання в біоелектричній системі саджанців молодих рослин дозволяє їй ефективно працювати вже з перших днів після монтажу та практично на повну потужність через два тижні після внесення в субстрат паростків рослин. Вже за дві доби після встановлення системи показники сили струму зростали більше як удвічі, а середня сила струму біосистеми на другий тиждень культивування складала 43.3 – 44.1 мА.



**Рис. 12** Середня сила струму біосистем з *A. plantago-aquatica* на протязі 40 тижнів експерименту за різних температурних умов та в залежності від росту рослин і додавання бактерій (10 Ω), ( $\bar{x} \pm SE$ , n=20), \*  $P < 0.05$

Внесення бактерій *Desulfovibrio* sp. мало позитивний ефект (32.8%) на продукцію біоелектрики в екстремальних умовах різких температурних перепадів та без додаткового освітлення під час всихання рослин та після їх загибелі, коли електроактивні мікроорганізми біосистем існували за рахунок гідролізу відмерлих корневих клітин (рис. 12). Збільшення струму при однакових температурних умовах та освітленні є істотним при внесенні *Desulfovibrio* sp. з 14-го тижня ( $P < 0.05$ ). Ймовірно, властива бактеріям роду *Desulfovibrio* електрохімічна активність (Zheng et al., 2021), нітрогенфіксація (Beijerinck, 1901) і редукція сульфату (Pfennig, 1989) може відіграти важливу роль в максимізації збору біоелектрики. Даний факт відкриває перспективи

бактерій *Desulfovibrio* sp. як важливого інструменту для підсилення функціональності біосистем генерації біоелектрики.

### **Генерація біоелектрики біосистемами з *F. arundinaceae* в енергоефективних будівлях**

Метою цієї роботи було розробити рослинно-мікробну біосистему генерації біоелектрики, що ефективно працює з універсальним ґрунтовим субстратом. Це має вагомe значення для розширення асортименту і видового різноманіття рослин для електробіотехнології. А також, біосистему, один біомодуль якої може генерувати силу струму близько 40-50 мА для можливості живлення відповідних приладів.

При виборі виду рослини для ґрунтової електробіотехнології та для експлуатації в енергоефективних будівлях наша увага була скерована на газонні трави роду костриці *Festuca* як на стресостійкі рослини. Цим рослинам притаманні цілий ряд наступних характеристик, які забезпечують стабільну роботу біоелектричних систем і їх бюджетність. Стійкість як до засухи, так і до перезволоження, відсутність строгої залежності рослини від режиму поливу спрощує догляд за біосистемою, а помилки у догляді, такі як, надмірний полив, чи навіть відсутній полив певний час, не ведуть до загибелі рослини. Стійкість до високих температур є особливо актуальною в літній період для рослин розміщених перед вікнами, а тіншовитривалість розширює можливості розміщення біосистем у приміщеннях. Розвиток на різноманітних субстратах, розвинута коренева система, багаторічність, здатність швидко розмножуватись насінням, космополітизм, стійкість до захворювань роблять рослини цього роду відмінним біокомпонентом електробіотехнології.

Як показали дослідження, *F. arundinacea*, формуючи цілорічний зелений покрив в складі біосистеми з інтегрованими в ґрунт електродними системами є невибагливою та високоелектропродуктивною в умовах приміщень будівель (рис. 13). Середньорічний та максимальний рівень генерації біоелектрики біосистеми з *F. arundinacea* є близьким до *A. plantago-aquatica* та становив 44.56 мА та 57.36 мА, відповідно при 10  $\Omega$ . В поляризаційних експериментах при використанні різних зовнішніх навантажень біосистема з *F. arundinacea* характеризувалася на 20.95 % вищою потужністю, ніж біосистема з *A. plantago-aquatica*. Біотехнологічна система з *F. arundinacea* ефективна круглорічно, сезонне зниження рівня біоелектрики складає 13.18 % (табл. 2). Трав'яний зелений покрив в умовах будинку дозволяє отримувати біоелектрику незалежно від сезонних умов, що особливо актуально для країн північних широт.

Розвиток рослин безпосередньо впливає на електропродуктивність біосистеми (рис. 13). На відміну від системи з *A. plantago-aquatica*, яка працювала практично на повну потужність з перших днів завдяки використанню саджанців рослин, тут спостерігається інша картина завдяки насінню рослин. В динамічній картині сили струму біосистеми можна виділити декілька періодів поетапного зростання біоелектричних показників, що корелюють з фазами розвитку рослин: адаптації (протягом 0 – 2-ої доби), проростання насіння (3 – 10-та доба), появи



перших паростків (11 – 20-та доба) та фази активного росту зеленої біомаси (21 – 90-та доба). Біоелектрична система працює вже з перших хвилин після її інсталяції за рахунок донорів електронів, що містяться у ґрунті. Починаючи з 20-ої доби - фази активного розвитку зеленої біомаси рослин - середній струм є статистично значимо вищим в порівнянні з середнім струмом фази проростання насіння ( $P < 0.05$ ).

Отже, система працює практично на повну потужність з 40-ої доби після інсталяції біосистеми, коли об'єм зеленої біомаси та рівень фотосинтетичної активності рослин досягають свого максимуму. Генерація біоелектрики біосистемою найвища в час найвищої фотосинтетичної активності рослин у літній період та початок осіннього періоду. Коефіцієнт Пірсона показує високу кореляцію розвитку рослин і генерації біоелектрики біосистемою і складає 0.85.



**Рис 13** Генерація сили струму біосистемою з *F. arundinacea* протягом перших 3-х місяців (10 Ω) ( $x \pm SE$ ,  $n=20$ ), \*  $P < 0.05$

Отже, дві розроблені біосистеми для енергоефективних будинків на основі водного подорожника та костриці очеретяної ефективні цілорічно і характеризуються високою потужністю електроенергії (табл. 2). Сезонний рівень редукції біоелектрики є незначним 8.71–13.18%. Проте, біосистема, базована на *F. arundinacea*, характеризується як вищою потужністю, так і більшою економічністю. Біосистема з *F. arundinacea* є в 1.5 рази більш економічно вигідною, в основному, завдяки рослинному компоненту. Вартість 1 г насіння широко розповсюджених рослин *F. arundinacea* є в 83.3 рази нижчим від вартості двох саджанців *A. plantago-aquatica*, необхідних для одної біосистеми.

Догляд за двома типами біосистем нескладний і доступний кожному та полягає в поливі 2 – 3 рази на тиждень. Біоелектричні системи, базовані на *A. plantago-aquatica* та *F. arundinacea* мають хороші базові характеристики для подальшого вдосконалення та максимізації збору біоелектрики в енергоефективних будинках. Декоративне озеленення в будинках, озеленені засклені балкони і лоджії будинків та зимові сади є альтернативою зеленим

дахам як джерела електроенергії в країнах з суворим чи засушливим кліматом і вирішують проблему втрат біоелектрики в умовах *in situ* в холодні пори року.

**Таблиця 2** Порівняльна характеристика біосистем з рослинами *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 <sup>2</sup> PGA	702±18	888±21
Вартість рослинного компоненту, EUR	2.50	0.03
Вартість субстрату, EUR	0.45	0.67
Сумарна вартість біомодуля 0.0525м <sup>2</sup>	5.79/6.71	3.54/4.46

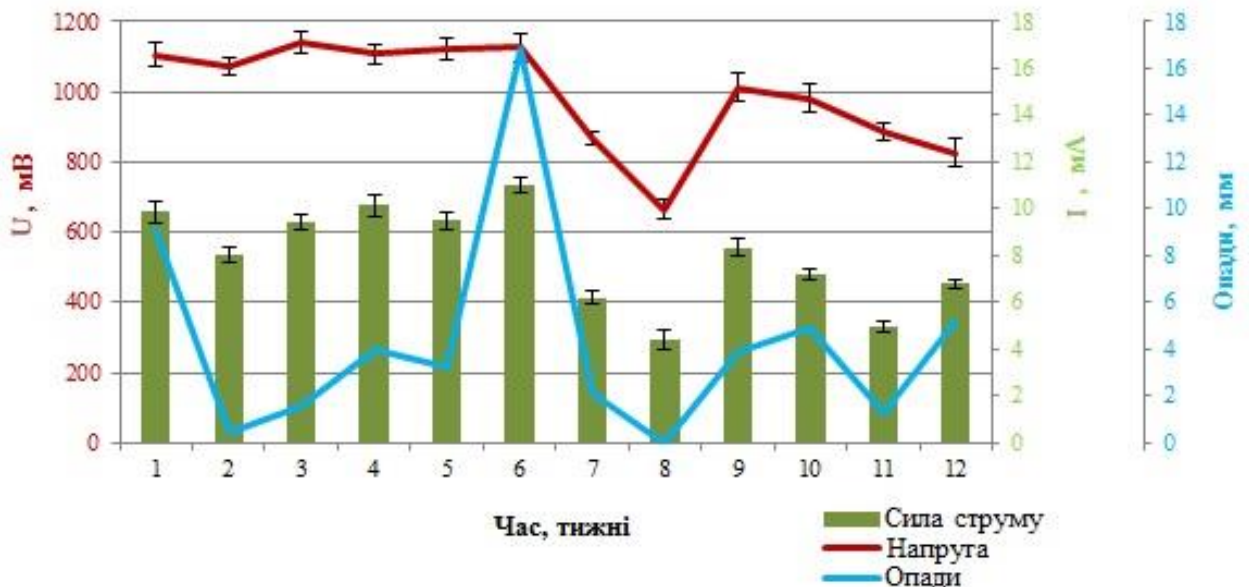
Наступне завдання полягало в розробці рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики для експлуатації на зелених дахах, відкритих терасах і балконах будівель, а також в дослідженні їх функціональності в кліматичних умовах м. Львова.

### **Перспективи біосистем з *C. palustris* на балконах і терасах будинків та *in situ*. Вплив розвитку рослин та аннелід на генерацію біоелектрики**

Для модельної електробіотехнологічної системи відкритих балконів і терас енергоефективних будинків було обрано рослину *C. palustris*, яка володіє цілим комплексом важливих для цієї мети характеристик, серед яких наступні: 1) рослина є першоквітцем, що розкриває можливість отримувати біоелектрику вже з ранньої весни, коли земляний покрив позбавлений рослинності; 2) зимостійка, витримує морози до -35°C, що актуально для застосування технології в країнах помірного поясу; 3) багаторічна; 4) декоративна; та 5) широко поширена в заболочених ділянках в помірному поясі Північної та Південної півкулі.

Експерименти *in situ* в природних болотистих екосистемах з двоелектродними системами показали перспективність *C. palustris* як біокомпонента електробіотехнологічних систем. Зразки характеризувалися одними з найвищих значень напруги та сили струму серед досліджених нами зразків *in situ*, максимальні значення напруги становили 1454 мВ, а сили струму 11.20 мА в оптимальних природних умовах місцезростань. Було показано позитивний ефект впливу опадів на генерацію біоелектрики: коефіцієнт кореляції Пірсона сили струму та кількості опадів був високим та становив 0.62 (рис. 14). Водночас, експерименти *in situ* продемонстрували зниження показників біоелектрики під час періодів посухи в зв'язку з кліматичними особливостями, що є загальною проблемою функціонування всіх рослинно-мікробних біоелектричних систем, розроблених в світі. Під час тривалих посушливих періодів (7-ого і 8-ого тижня всередині липня та 10-ого і 11-ого тижня всередині серпня) спостерігалось зниження рівня біоелектрики.

Рослини реагували незначним падінням біоелектрики під час першого періоду посухи (2–3-й тиждень експерименту), проте коли рослини частково втратили листя (більше 30%) і стали всихати під час другого періоду посухи (протягом 7–8-го тижня експерименту) падіння біоелектрики було більш істотним (рис. 14). Молоді рослини, які розвинулися на місці всохлих рослин забезпечували в 1.52 раз нижчі значення біоелектрики.

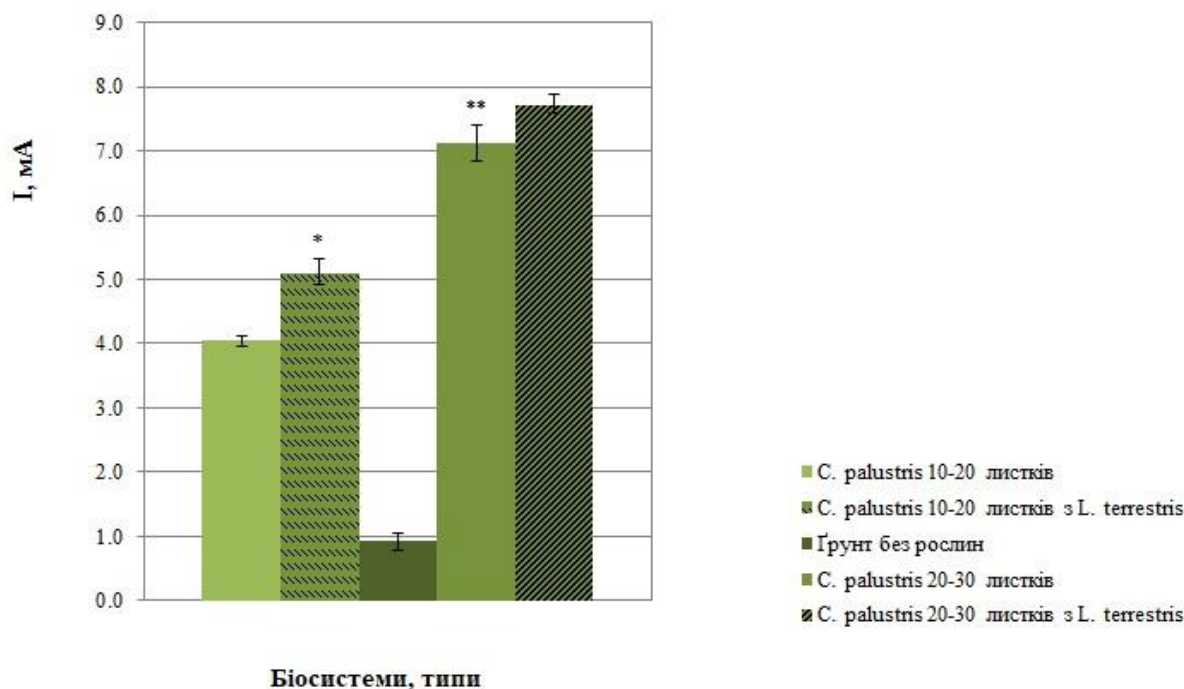


**Рис. 14** Динаміка біоелектричних параметрів біосистем *C. palustris in situ* протягом 12-ти тижнів літнього періоду в залежності від кількості опадів ( $x \pm SE$ ,  $n=10$ ).

Експерименти на терасах та балконах будинків показали позитивний ефект анелід *L. terrestris* як біопідсилювачів продукції біоелектрики біосистем з *C. palustris*. У зразків із слабкорозвинутою фотосинтетичною поверхнею (кількість листків 10-20) сила струму була суттєво нижчою, ніж в біосистемах з рослинами, які мають активно розвинуту листяну масу (20–30 листків). Проте із інтродукцією *L. terrestris* показники біоелектрики зростали на 14.3% ( $P < 0.05$ ) (рис. 15). Сила струму у рослин з невеликою кількістю листків, але із інтродукцією *L. terrestris*, а також в зразків з найбільш розвинутою листяною масою є суттєво вищою в порівнянні із рослинами з невеликою кількістю листів та ґрунтом без рослин ( $P < 0.05$ ). Як відомо, продукти життєдіяльності анелід підвищують родючість ґрунту та створюють додаткові центри мікробної активності, що важливі для розвитку електрогенеруючих мікроорганізмів. Виявлена нами чутливість генерації біоелектрики до рівня вологи ґрунту, інтенсивності розвитку рослини та позитивна реакція на внесення *L. terrestris* важливі для оптимізації умов культивування *C. palustris* для ефективного отримання біоелектрики у контейнерах на відкритих балконах і терасах енергоефективних будинків.

## Біотехнологічні системи на основі мохів на зелених дахах. Вплив метеофакторів

Технологія облаштування дахів з рослинним покриттям, так званих зелених дахів, останнім часом набула великої популярності як частина стратегії вуглець нейтральності. В даному контексті для облаштування зелених дахів було розроблено рослинно-мікробні біосистеми генерації біоелектрики на основі мохів та осок.



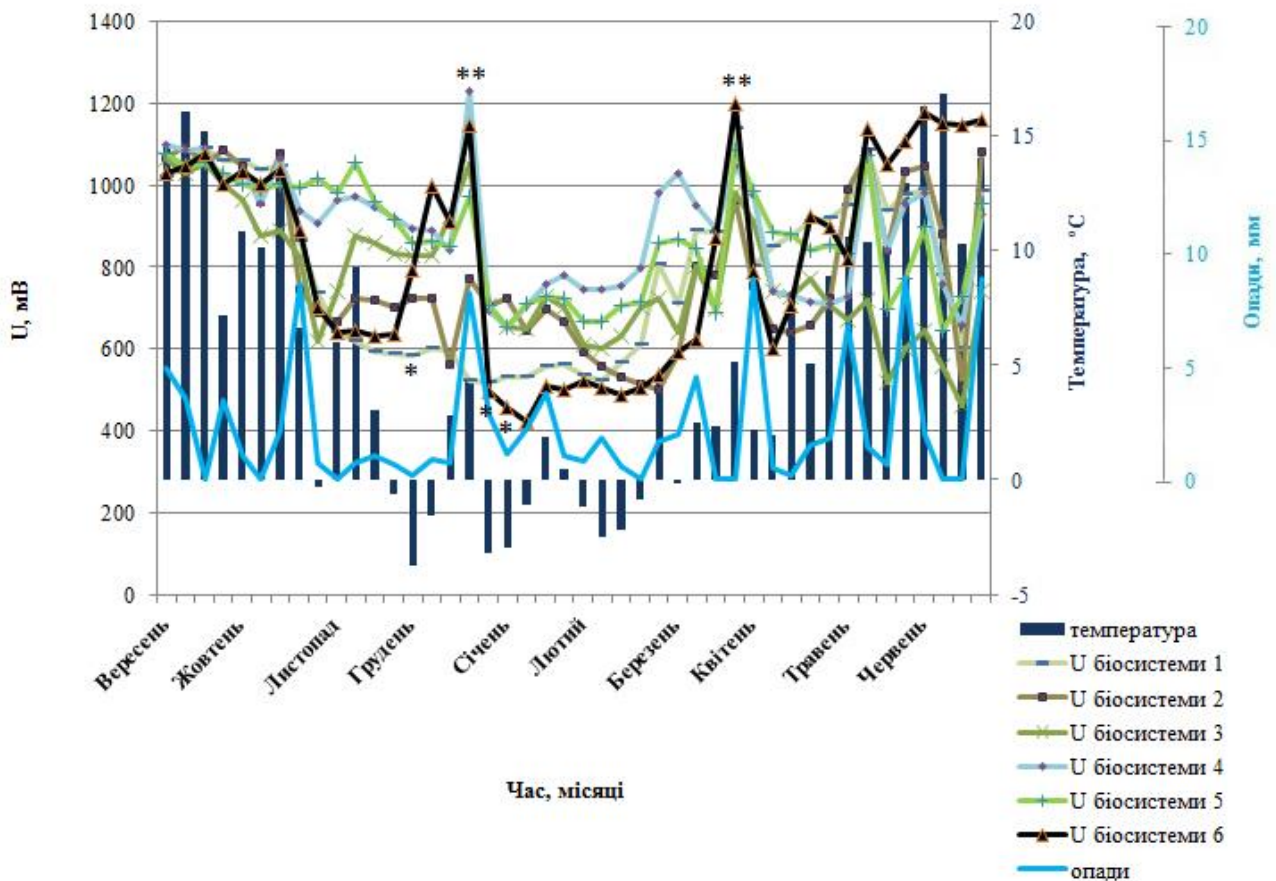
**Рис. 15** Середня сила струму двоелектродних біосистем, базованих на *C. palustris* та балконах впродовж одного місяця ( $\bar{x} \pm SE$ ,  $n=10$ )

\*  $P < 0.05$ , рослини з невеликою кількістю листків, але із інтродукцією *L. terrestris*,  
\*\*  $P < 0.05$ , рослини з найбільш розвинутою листяною масою

Мохи були обрані компонентом біосистем зелених дахів через їх стресостійкість та невибагливість: 1) резистентність до посухи і ультрафіолету сонячної радіації; 2) стійкість до високих та низьких температур; 3) можливість сформувати суцільний килим на покрівлі в умовах лімітованої площі для розвитку ризоїдів та відсутності поживних речовин; 4) здатність генерувати біоелектрику (Hubenova and Mitov, 2012, Vombelli et al., 2016, Castresana et al., 2019, Sac et al., 2022). Мохи є поширеними як бур'яни на дахах по всьому світу, вони ростуть в таких екстремальних умовах, як арктичні регіони та пустелі. Проте їх здатність працювати у складі біосистем генерації біоелектрики на дахах була недосліджена.

Було вивчено вплив метеофакторів та різних конфігурацій електродних систем на функціонування біосистем з мохами на зелених дахах. Біосистеми, базовані на мохах перебували в складних погодних умовах в незахищених від

несприятливих умов контейнерах: різких коливаннях температури, заморозках до  $-19^{\circ}\text{C}$ , тривалих посухах та зливах. Разом температура повітря та кількість опадів мали сукупний суттєвий вплив на функціонування біосистем на дахах та генерацію ними біоелектрики. Температура вище  $+10^{\circ}\text{C}$  та відсутність тривалого зниження кількості опадів нижче 5 мм/доба були оптимальними для генерації біоелектрики в цих умовах (рис. 16). Зниження температури від визначеного оптимального рівня та тривалі посухи виступали лімітуючими факторами, які викликали зниження напруги і сили струму та нестабільність роботи біосистем залежно від метеоумов. 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 ( $P < 0.05$ ).



**Рис. 16** Динаміка генерації напруги біосистем 6-ти різних структур з мохами із вересня до червня ( $\bar{x} \pm \text{SE}$ ,  $n=20$ )

\* $P < 0.05$ , період заморозків, \*\*  $P < 0.05$ , тривалий період опадів

Конфігурація електродних систем мала вагоме значення для ефективності роботи біосистем. Біосистеми, де конфігурація електродів забезпечувала в 1.7 рази більшу площу контакту з субстратом, дозволяли отримувати вищі в 1.2 рази значення біоелектрики. Було розроблено ефективні конфігурації електродних систем з посиленням додатковим кріпленням та водночас стабільні до впливу

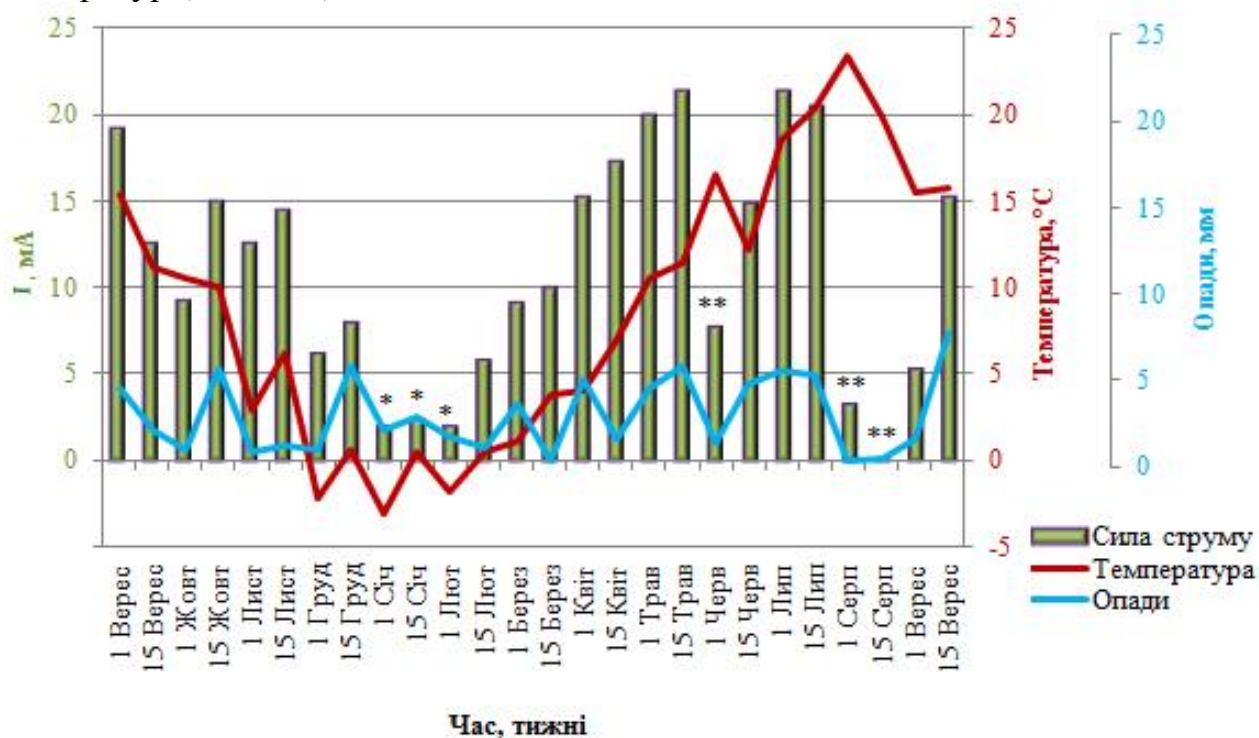


метеофакторів, оскільки в перших експериментах ми стикнулися з проблемою виходу з ладу частини біосистем після зимового періоду внаслідок пошкоджень з'єднань електродів за рахунок сили розширення замерзлої води.

Функціонуючі на вихідному рівні після зимового періоду біосистеми з мохами відкривають перспективи використання їх на дахах будівель в кліматичній зоні міста Львова після оптимізації в таких напрямках: вирощування мохів у ґрунті в складі екстенсивного чи інтенсивного зеленого даху та використання теплоти відпрацьованих газів систем опалення.

### Біотехнологічні системи на основі осоки *C. hirta* на зелених дахах

Осоку шершаволисту *C. hirta* було обрано як біокомпонент для розробки біоелектричних систем для експлуатації у відкритому ґрунті на дахах будівель насамперед через: 1) зимостійкість рослини; 2) виживання в посушливих умовах; 3) невибагливість до умов зростання; 4) декоративність; 5) широко поширеність; та б) здатність до очищення забруднень. Річний експеримент в кліматичних умовах заходу України, проведений на дахах університетських будівель м. Львова показав, що генерація біоелектрики систем з осоками є більш стійкою до метеофакторів в порівнянні із системами з мохами. Лімітуючими факторами для роботи біосистем, базованих на *C. hirta* є температури нижче 0°C та тривалі посушливі періоди із нижче як 5 мм опадів/доба під час сприятливих плюсових температур довкілля (рис. 17). Сила струму суттєво опускається під час мінусових температур та тривалих посушливих періодів за оптимальних температур ( $P < 0.05$ ).



**Рис. 17** Динаміка сили струму біосистем, базованих на *C. hirta* в залежності від впливу метеофакторів протягом року на дахах будинків ( $x \pm SE$ ,  $n=20$ ). \* $P < 0.05$  в період мінусових температур \*\*  $P < 0.05$  під час тривалих посушливих періодів за оптимальних температур

Продуктивність біоелектрики біосистем падає в засушливих умовах та в зимовий період, але повністю відновлює свій рівень при підйомі температури та відновленні опадів за короткий період часу. Біосистеми на основі осоки була ефективнішою від системи на основі мохів в 1.7 раз. Біосистеми, базовані на *C. hirta* із електродними системами із збільшеною площею контакту із субстратом та посиленням кріпленням є більш ефективними для збору біоелектрики в умовах як короткотривалого, так і довготривалого навантаження, а також є стійкими до дії несприятливих метеофакторів.

### Порівняння біоелектропродуктивності та економічності рослинно-мікробних біосистем генерації біоелектрики

Вартість одного біомодуля біосистем для енергоефективних будинків та зелених дахів представлені в табл. 3. Вартість біосистем коливалася від 0.84–9.18 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, 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.

Таблиця 3 Вартість компонентів одного модуля біосистем

Складові елементи	Біосистеми					
	<i>O. basilicum</i>	<i>A. plantago-aquatica</i>	<i>F. arundinacea</i>	<i>C. palustris</i>	мохи	<i>C.hirta</i>
	<b>Вартість, EUR</b>					
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	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 електротранспорту для конструювання катодної системи,

\*\* використання відходів харчової промисловості як контейнерів для компактних біосистем



Потужність біосистем, розроблених у світі є невисокою, тільки кільком науковим групам вдалося досягнути потужності вище 100 мВт/м<sup>2</sup>. В даній роботі найвища потужність зафіксована у біосистемах для енергоефективних будинків з *F. arundinaceae* та біосистемах з *C. hirta* для зелених дахів (табл. 4). Ймовірно, висока здатність до генерації біоелектрики зумовлена розвинутими мичкуватими кореневими системами, кореневищами з додатковими коренями, притаманними цим видам рослин та високим накопиченням їх як наземної фотосинтетичної, так і кореневої маси. Як відомо, кожному виду рослин властивий свій ризодепозит (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-стеблевої маси, біосистеми з однорічними рослинами з нерозвинутими стрижневою кореневою системою та ризоїдами. 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.

**Таблиця 4** Біоелектричні параметри багатоелектродних біосистем на основі різних видів рослин

Рослинний компонент біосистем	Висота рослини, м	Накопичення листяно-стеблевої маси, г/м <sup>2</sup>	Накопичення кореневої маси, г/м <sup>2</sup>	Коренева система, тип	Потужність, мВт/м <sup>2</sup> 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

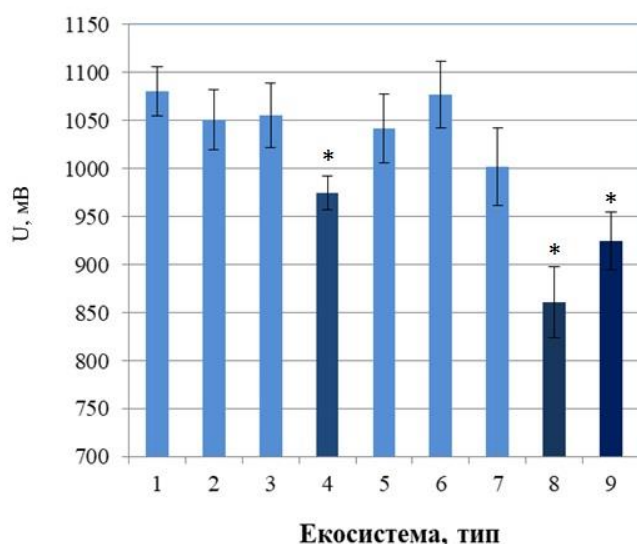
### Біоелектропродуктивність біосистем *in situ*

Вперше показано перспективи природних екосистем лісів, заболочених луків, урбоекосистем паркових та лісопаркових зон, агрооекосистем, біотопів зелених смуг вздовж автотрас як джерела поновлюваної біоелектрики в кліматичних умовах заходу України. Біоелектрика фітомікробоценозів

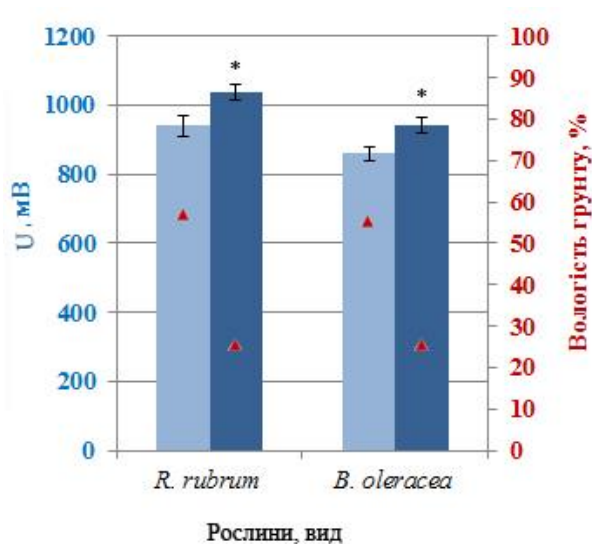
агрокультур, сильно забруднених газонів вздовж автотрас і біотопів занедбаних паркових зон з високим ступенем ущільнення ґрунту внаслідок антропогенного навантаження є суттєво нижчою на 9.2–20.3% ( $P < 0.05$ ) від біотопів екосистем лісу (рис. 18).

Різниця між середніми значеннями напруги *in situ* фітомікробіоценозів лісу, урбоекосистем паркових зон і лісопарків, агроекосистем фруктових садів та заболочених луків є статистично незначною. Вищі параметри біоелектрики у лісових, лісопаркових та садових фітомікробіоценозах, очевидно, зумовлені їх: 1) потужним ризодепозитом; 2) активно розвинутою поверхневою кореневою системою, зв'язаною мікоризою; 3) великою кількістю рослинного опаду і, як результат, стабільними і оптимальними умовами для розвитку електрикогенеруючих мікроорганізмів. В цих екосистемах відсутні несприятливі для мікробіоти фактори, якими є: 1) щорічне зрушення ґрунту, чи використання агрохімії, притаманне землям сільськогосподарського призначення; або ж 2) руйнування структури ґрунту, що порушує можливість отримувати вологу і кисень електроактивним організмам в повній мірі, як це має місце у занедбаних газонах з ділянками ущільнення ґрунту; чи 3) вплив на рослини і мікроорганізми токсикантів вихлопних газів автомобілів, як це відбувається в інтенсивно забруднених газонах вздовж автотрас.

Зростання вологості ґрунту в багатьох випадках мало істотний позитивний вплив на рівень напруги. Короткочасове зниження вологості істотно не впливало на напругу фітомікробіоценозів біотопів *in situ*. Крім того, зафіксовані випадки росту напруги при нетривалому зниженні вологості ґрунту (рис. 19).



**Рис. 18** Напруга рослинно-мікробних біосистем *in situ* впродовж 150-ти днів: 1 – лісів, 2 – заболочених луків, 3 – садів, 4 – агрокультур, 5 – парків, 6 – лісопарків, 7 – газонів вздовж трас (помірне забруднення), 8 – занедбані газони з ущільненим ґрунтом, 9 – газонів вздовж трас (сильне забруднення) ( $x \pm SE$ ,  $n=50$ ), \*  $P < 0.05$



**Рис. 19** Напруга рослинно-мікробних садових та агрокультурних біосистем при зниженні вологості ґрунту із 55% на 81-ий день експерименту до 25% на 89-ий день експерименту ( $x \pm SE$ ,  $n=5$ ), \*  $P < 0.05$

Незважаючи на зниження вологості ґрунту на 89-ий день експерименту напруга істотно зростає в порівнянні з 81-им днем ( $P < 0.05$ ). Даний факт служить ознакою визначальної ролі в генерації біоелектричного потенціалу: 1) фотосинтетично залежної екскретивної активності рослин, здатних функціонувати в широкому діапазоні умов, і здатних забезпечувати оптимальні умови для електроактивних мікроорганізмів, та 2) ролі ризосферних мікроорганізмів, які виживають в широкому діапазоні вологості.

Біоелектропродуктивність фітомікробіоценозу газонів вздовж автотрас виявилася резистентною до забруднення важкими металами. На розмежувальних зелених смугах автотрас можна диференціювати зони різної концентрації поллютантів: 1) сильно забруднені ділянки, безпосередньо біля світлофору, оскільки тут на протязі цілого дня зупиняються та стартують автомобілі; та 2) зони помірного забруднення, зосереджені на відстані від світлофору. Було виявлено, що значне перевищення вмісту одного токсиканта не пригнічує генерацію біоелектрики. Таким помірно забрудненим зразкам були характерні досить високі середні значення біоелектричного потенціалу ( $1101.6 \pm 37$  мВ), як наприклад, в біосистемах, де було зафіксоване перевищення в 33 рази гранично допустимого вмісту лише одного металу II-ого класу небезпеки міді (Cu). В той же час, перевищення гранично допустимої норми кількох токсикантів веде до зниження напруги. В сильно забруднених біотопах середня напруга складала лише  $833.5 \pm 20$  мВ. В таких сильно забруднених біосистемах було виявлене значне перевищення вмісту кількох металів високого класу небезпеки: гранично допустима концентрація (ГДК) елементів I-ого класу небезпеки кадмію (Cd) і цинку (Zn) перевищувала норму в 43.0 і 19.3 рази, відповідно, а міді (Cu) в 49.7 раз.

Отже, зниження генерації рослинно-мікробної біоелектрики спричинюється забрудненням ґрунту лише одночасно кількома металами високого класу небезпеки, концентрації яких перевищували гранично допустимі більше як в 10 разів. Такі забруднення мають місце на невеликому сегменті розділяючих зелених смуг вздовж автотрас біля світлофорів. Це має значення, оскільки біоелектрика фітомікробіоценозів вздовж автотрас могла б жити дорожнє освітлення.

Розвиток біотехнології отримання біоелектрики *in situ* відкриває можливості природніх урбо- та агроєкосистем як джерела поновлюваної та стабільної зеленої енергії. Рослинно-мікробна біоелектрика може також бути важливим індикатором стану екосистем, наявності несприятливих факторів довкілля та потреби застосування заходів для їх відновлення.

## 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. cupressiforme*, *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/м<sup>2</sup> 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* слугували 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/м<sup>2</sup> та густини потужності 188 мВт/м<sup>2</sup> 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.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ 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, 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, Web of Science, 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. тіног*. *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.есо.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.есо.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.есо.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, фахове видання** (здобувачу належить проведення частини експериментів та аналізу результатів)
23. Джура, Н.М., Мороз, О.М., Русин, І.Б., Кулачковський, О.Р., Цвілинюк, 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. **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. **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<sup>ts</sup>* 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 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. DoublePublishing, 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 Маю 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. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-111-4-22> *(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. ХХІІ міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ 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 ХІ Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів (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 студентів та аспірантів (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.**, & Patladyuk, 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 X Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів (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 III 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 мікроборослинних 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), ЛьЦНІ, 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 студентів

- та аспірантів (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 студентів та аспірантів (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 студентів та аспірантів (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 студентів та аспірантів (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 студентів та аспірантів (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 студентів та аспірантів (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)*

## АНОТАЦІЯ

**Русин І.Б. Біотехнологічні основи отримання електрики у рослинно-мікробних біосистемах.** – Наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена розробці нових ефективних, економічних та екологічних способів отримання рослинно-мікробної біоелектрики у будинках всередині і на дахах, а також оцінці біоелектропродуктивного потенціалу екосистем *in situ*. Сконструйовано рослинно-мікробні біосистем генерації біоелектрики на основі рослин *A. plantago-aquatica*, *F. arundinacea*, *C. palustris*, *C. hirta*, *O. basilicum*, *H. soleirolii* та мохів *H. cupressiforme*, *P. commune*, *L. glaucum* для цілорічного використання у будинках та на дахах. Вперше досягнуто прогресу в компактності та кількості модулів біосистем при збереженні виходу біоелектрики. Дво- і три-модульні 0.6л багатоелектродні біосистеми базовані на прямих чи декоративних рослинах *O. basilicum* і *H. soleirolii* служили автономним та екологічно чистим джерелом живлення для цифрових приладів та світлодіодів в режимі реального часу, замінюючи батареї 1.5 В та 3.0 В. Виявлено позитивний ефект бактерій *Desulfovibrio* sp. та анелід *L. terrestris* як енхансерів, які підвищують генерацію біоелектрики біосистем з *A. plantago-aquatica* та *C. palustris* на 32.8% та на 14.3%, відповідно. 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

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

## ANNOTATION

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

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

The dissertation is devoted to the development of novel ecological plant-microbial bioelectrical systems that are efficient and economical for use in energy efficient buildings and on green roofs and to also assess the bioelectroproductive potential of natural ecosystems *in situ*. New approaches have been proposed such as alternative species plants and different biological enhancers, new electrode materials and multielectrode biosystems, new electrode configurations and their connections, that efficiently increase the bioelectric output of biotechnology. The use of cost-effective materials in the design of biosystems, including using waste material, seeds and seedlings of common plants and simple substrates reduces the cost of electrobiotechnology without loss of efficiency. Several new types of biosystems for year-round bioelectricity generation and application in an energy-efficient buildings

and on a green roofs have been developed. Biosystem operations have been investigated depending on various biological factors (plant growth, plant species, introduction of active microorganisms and annelids), external conditions (temperature and precipitation) and technological (materials, schemes and configurations).

Effective and year round operated biosystems have been developed based on plants: *A. plantago-aquatica*, *F. arundinacea*, *C. palustris*, *C. hirta* *O. basilicum*, *H. soleirolii* and mosses *H. cupressiforme*, *P. commune*, *L. glaucum* for inside buildings and their green roofs. It was found that the highest capacity was demonstrated by biosystems based on grass *F. arundinacea* (in buildings inside) and biosystems based on sedge *C. hirta* (on green roofs). The biosystem with plant *F. arundinacea* was characterized by 20.95% higher power than the biosystem with *A. plantago-aquatica* and was 1.5 times more economically beneficial during application in energy-efficient buildings inside. The biosystem based on sedge *C. hirta* was characterized by a power of 950 mW/m<sup>2</sup> PGA and was 1.7 times more efficient than the biosystem based on mosses on green roofs at a temperature above 0°C and an amount of precipitation of 5 mm/day that opens perspective their use on green roof as bioelectricity source.

For the first time, progress in the compactivity of total size and a number of the modules of biosystems has been achieved while maintaining the output of bioelectricity. Two- and three-modules of 0.6L multielectrode biosystems based on edible or ornamental plants *O. basilicum* and *H. soleirolii*, respectively, served as an autonomous and environmentally friendly power source for an indoor weather station, digital clock, digital thermometer/hygrometer and LEDs replacing 1.5V and 3V batteries in real time. The maximum recorded values of current density in the three-module electro-biosystem was 407 mA/m<sup>2</sup> and power density was 188.33 mW/m<sup>2</sup> PGA. A high degree of correlation between bioelectricity generation and plant growth was shown, with the Pearson coefficient was from 0.67 to 0.98. For the first time, the positive effect of bacteria *Desulfovibrio sp.* and annelid *L. terrestris* were shown as enhancers of biosystems based on *A. plantago-aquatica* and *C. palustris*, which increased output to 32.8% and 14.3%, respectively.

For the first time, the potential of natural ecosystems of forests and marshy meadows, agroecosystems, urban ecosystems of park zones and polluted lawns along city highways are shown as a source of renewable bioelectricity in the climatic conditions of west of Ukraine. Phytomicrobocenoses of lawns along highways were resistant to pollution by heavy metals, and, their bioelectrical productivity decreases only when polluted simultaneously by several heavy metals of a high danger class, exceeding the MPC by more than 10 times.

The cumulative effect of a reducing the inter electrode distance and a combination of a parallel-series connection of multielectrode biosystems based on a new pair of graphite and perforated Zn-galvanized steel electrodes is shown as an effective way of maximizing the obtained plant-microbial bioelectricity. The revealed potential of ecosystems *in situ* and developed bioelectrotechnologies for energy-efficient buildings open wide possibilities for further improvement in obtaining plant-microbial bioelectricity.

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

*Підписано до друку: 20 липня 2023 р. Формат 60x90/16.  
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.  
Умов. друк. арк. 1,9 Тираж 75 прим.  
Видавництво ПАІС  
вул. Гребінки, 5 м. Львів 79000*

