

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Русин Ірини Богданівни**
«Біотехнологічні основи отримання електрики у
рослинно-мікробних біосистемах»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук
за спеціальністю 03.00.20 – Біотехнологія

1. Актуальність обраної теми дослідження дисертації

Пошук альтернативних, відновлювальних, екологічно чистих та безпечних джерел енергії є однією з провідних наукових проблем сьогодення. Для України питання енергобезпеки та енергозабезпечення є особливо актуальним, беручи до уваги значні руйнування тепло- та гідроелектростанцій протягом 2022-2023 рр. внаслідок варварських російських ракетних ударів та бомбардувань. З огляду на це, дисертаційна робота Ірини Русин, яка присвячена дослідженню та розробці способів використання ґрунтової рослинно-мікробної взаємодії для отримання енергії (електрики) є безумовно актуальною та практично нагальною. Біотехнології, що базуються на використанні взаємодії живих рослин і їх ризосферних мікроорганізмів, беззастережно є екологічно безпечними, а також ресурсозберігаючими та безумовно вносять великий вклад на шляху до вуглецевої нейтральності. Озеленення та, так звані зелені біотехнології, є важливим способом подолання як причин, так і наслідків глобальної зміни клімату. Стратегія розвитку сучасних міст докорінно трансформується - планах розвитку закладаються нові принципи екологічних міст із енергоефективними будинками та зеленими дахами на будівлях. В цьому контексті дослідження, проведені в дисертаційній роботі, є високозатребуваними.

Біотехнологія рослинно-мікробної біоелектрики є доволі молодого галуззю науки, яка бере свій початок з 2008 року із досліджень на рисових полях та в лабораторних умовах з болотними травами. Низкою досліджень показано, що генерація біоелектрики залежить від багатьох чинників. Так, показано зниження ефективності генерації біоелектрики в залежності від сезону. Розроблені на сьогодні підходи для отримання електрики за допомогою ґрунтових рослин та їх ризосферних мікроорганізмів недостатньо ефективні. Основні проблеми, що гальмують розвиток і застосування біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики, - це низька потужність і висока вартість матеріалів. Окрім цього, наявні прототипи є досить громіздкими. 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). Тому

дослідники продовжують активно працювати над оптимізацію умов для максимального отримання біоелектрики та над здешевленням технології. Враховуючи це, дисертаційна робота Ірини Русин є важливим внеском у розвиток інноваційної біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики, зокрема в Україні, де ці технології ще практично відсутні.

Робота є частиною науково-дослідних тематик кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська Політехніка», що здійснені під керівництвом дисертантки: «Застосування біоремедіативних систем для техногенно забруднених ґрунтів та водойм», (номер державної реєстрації 0114U001223, 2013 р.) та «Електро-біосистеми для отримання рослинно-мікробної біоелектрики» (номер державної реєстрації 0120U100027, 2020 р.)

2. Оцінка змісту дисертації та її завершеності

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.

У першому розділі розкрито основні біоелектрохімічні принципи біотехнології отримання рослинно-мікробної біоелектрики, описано історію розвитку ідеї щодо використання мікроорганізмів для отримання електрики, проведено дослідження сучасного стану проблеми у світовому масштабі. У другому розділі описано розроблені у роботі біосистеми генерації біоелектрики, умови експериментів в будинках та *in situ* та методика досліджень. В третьому – дев'ятому розділах представлено результати та обговорення власних досліджень щодо оптимізації умов та перевірки ефективності розроблених біосистем генерації біоелектрики всередині будинків, на зелених дахах та в природних біотопах *in situ* при дії різних біологічних і технологічних чинників та чинників довкілля (температури, вологості). В цих розділах розв'язуються такі проблеми: розробка структури біомодулів для отримання рослинно-мікробної біоелектрики, оцінка біоелектропродуктивності природних екосистем (лісових систем, заболочених лук, агроекосистем, урбоекосистем паркових і лісопаркових зон та на техногенно забруднених газонах вздовж автотрас) *in situ*, отримання біоелектрики біотехнологічними системами всередині будівель з використанням біосистем на основі частухи подорожникової *Alisma plantago-aquatica* та костриці очеретяної *Festuca arundinacea*, а також, перспективи біосистем з калюжниці болотної *Caltha palustris* на балконах і терасах енергоефективних будинків та *in situ*, біосистеми, базовані на мохах (*Hypnum cupressiforme*, *Polytrichum commune*, *Leucobryum glaucum*) та осоках (*Carex hirta*) на зелених дахах енергоефективних будинків. Також дисертанткою досліджено роль бактерій *Desulfovibrio* sp. та дощового черв'яка *Lumbricus*

terrestris як активаторів електрогенезу біосистем з рослинами *A. plantago-aquatica* та *C. palustris*, відповідно.

Загалом дисертаційна робота написана на високому професійному рівні, матеріали подані структуровано та послідовно.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Дисертація виконана на великому обсязі експериментального матеріалу з використанням класичних методів дослідження та моделей, адекватних меті та завданням роботи. Результати проведених досліджень статистично опрацьовані. Усі наукові положення цілком обґрунтовані, висновки відповідають поставленим задачам та змісту роботи і повністю відображають результати досліджень. Наукові положення та висновки, отримані в результаті аналізу результатів експериментів є логічними та обґрунтованими, обговорені в достатній мірі і співставлені та порівнювані з відповідними експериментальними роботами в галузі рослинно-мікробної біоелектрики. Матеріали дисертації опубліковані у 65 наукових працях, з яких 10 статей у виданнях, включених до наукометричних баз Scopus та Web of Science (2 статті Q1, 1 стаття Q2, 2 статті Q3, 3 статті Q4), 15 статей у інших наукових фахових виданнях України та 2 статті в науково-періодичних виданнях України, а також 3 патенти України на корисну модель та посібник і 33 тези доповідей у матеріалах у матеріалах наукових конференцій та з'їздів. Матеріали дисертації широко представлені в іноземних наукових періодичних виданнях. Статті опубліковані у журналах, де дотримуються високих стандартів якості, зокрема сліпого подвійного рецензування (peer review)

Основні положення і висновки роботи у повній мірі відповідають паспорту спеціальності 03.00.20 – Біотехнологія. Рівень наукового дослідження є високим.

4. Новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Це нова і перша робота для української науки в галузі рослинно-мікробної біоелектрики. Наукова новизна підтверджується трьома патентами України на корисну модель та публікаціями у високореєтингових журналах. Вперше запропоновано нові біотехнологічні рішення задля отримання ґрунтової рослинно-мікробної біоелектрики та оцінено перспективи природних екосистем лісів та луків, агроекосистем, урбоекосистем і техногенно забруднених територій як джерел біоелектрики.

Вперше розроблені біосистеми на основі кількох альтернативних видів рослин як болотних, так і трав та мохів для генерації біоелектрики в будинках та зелених дахах. Вперше показано вплив сіркобактерій *Desulfovibrio* sp. та анелід *L. terrestris* як біологічних активаторів генерації біоелектрики біосистем з рослинами *A. plantago-aquatica* та *C. palustris*, які суттєво

підвищували електричні показники біосистеми. Вперше розроблено біотехнології на основі морозостійких рослин із стабільними біоелектричними параметрами після зимового періоду для використання на зелених дахах. Вперше розроблений біоелектричний модуль на основі нової, економічно вигідної пари електродів: для отримання біоелектрики у поверхневих та глибинних шарах ґрунту. Удосконалення структури біомодуля вперше дозволило досягнути підвищення компактності біосистем при збереженні виходу енергії та автономно енергоживити світлодіоди, цифрову кімнатну метеостанції тощо 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.

5. Загальнонаціональне, світове та практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Результати, отримані в дисертаційній роботі підтверджені актами впровадження ТзОВ «ГАЛИЦЬКА БУДІВЕЛЬНА ГІЛЬДІЯ» і ПП «Укртекскolor» у м. Львові в житлових комплексах «Park Tower» та «ПАРУС СІТІ». А також, вони знайшли широке застосування для розвитку наукових досліджень в наукових проектах в наукових інститутах та університетах у США, Мексиці, Чехії та Польщі. Результати дисертації були також використані у навчальному процесі НУ «Львівська Політехніка».

Очевидно, що таке зацікавлення і впровадження результатів дисертаційної роботи зумовлене прогресом в економічності та ефективності, цілорічному функціонуванні і компактності біосистем, базованих на різних видах рослин та можливостями підсилення їх ефективності біологічними способами. Біосистеми з *A. plantago-aquatica* та *F. arundinacea* є фундаментом для розробки біосистем енергоживлення приладів, які споживають 50-100 мА та для LED-освітлення всередині будинків. Біосистеми з *O. basilicum* та *H. soleirolii* забезпечують автономне джерело енергії для приладів з низьким енергоспоживанням заміняючи батареї 1.5 В та 3.0 В. Хоча розроблені біосистеми отримання електрики не дають очікувано великої кількості електрики, вони є перспективними для забезпечення функціонування неенергоємних приладів і можуть стати незамінними у випадку тривалої відсутності стаціонарної електрики, що наразі дуже актуально для України. Це має також значення для економії ресурсів на виробництво батарейок та вирішення проблеми їх утилізації. Також важливо відзначити, екологічне значення біоелектрики - відсутність побічних забруднюючих сполук

дозволить суттєво знизити екологічне навантаження на як на урбоекосистеми, так і природні екосистеми.

Слід зазначити, що застосування прямих і декоративних рослин, як наприклад, базиліку та солейролії, надає подвійне практичне значення запропонованій біотехнології. Крім основного практичного значення як сталого джерела електрики, вони можуть також служити для декорування приміщень та кулінарних потреб.

6. Повнота викладу наукових результатів в наукових публікаціях за темою докторської дисертації та відсутність плагіату

Наукові результати дисертаційного дослідження представлені у 65-ти наукових працях. Варто відзначити десять статей у виданнях, включених до наукометричних баз Scopus та Web of Science. Серед них дві статті у високоректійнгових міжнародних журналах, що відносяться до Q1 кuartилю з високим Impact factor 14.982 та 7.963. П'ятнадцять статей опубліковано у інших наукових фахових виданнях України та ще дві статті в науково-періодичних виданнях України. Робота пройшла всебічну апробацію і представлена у тридцяти трьох тезах доповідей у матеріалах наукових з'їздів, міжнародних і вітчизняних конференцій та конгресів. Наукові положення дисертації викладені в повній мірі, як у фахових виданнях України, так і на міжнародному рівні в журналах Європи, США та Азії.

Аналіз тексту дисертації, не вказує на те, що в дисертаційній роботі може бути наявний плагіат чи фальсифікації, у подачі матеріалу простежується особистий стиль автора. Загалом, робота є оригінальною та самостійною завершеною науковою працею.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

Принципових недоліків у роботі мною не виявлено, але є ряд питань дискусійного характеру та зауважень до оформлення.

1. Мета роботи звучить як розроблення нової екологічно безпечної біотехнології цілорічного отримання рослинно-мікробної біоелектрики, але мікробна частина у роботі практично не вивчалась, окрім внесення додатково культури сульфатредукувальних бактерій. У роботі не аналізувався мікробний склад ні природних екосистем, ні урбоекосистем, ні мікробний склад універсального ґрунтового субстрату Esoflora. Тому, н-д, відмінності отримані окремої рослини *in situ* та при закладці в експерименті можуть бути зумовлені відмінностями у мікробному складі природного і експериментального середовища. Це, наприклад, може пояснювати низьку біоелектричну активність калюжниці на балконі, порівняно з природними умовами зростання. Калюжниця – тінелюбна рослина – тому питання низької

продукції біоелектрики, очевидно, не в освітленості а у складі ґрунту, зокрема і наявності мікроорганізмів. Окрім того, калюжниця болотна містить летку речовину протоанемонін, яка подразнює слизові і є токсичною для людини. Тому вибір власне цієї рослини для отримання біоелектрики у закритих приміщеннях є дискусійним.

2. У розділі 3.1 вказується що досліджували 25 біосистем на основі кімнатних, садових та лісових рослин і 6 пар електродів, але для якої біосистеми наведені результати на рис. 3.1.1.? Чи це усереднене значення для всіх біосистем? Результати, отримані для всіх біосистем варто було подати принаймні у додатках.
3. Рис. 3.1.1 Напруга біосистем, що генерувалася в залежності від матеріалів. Для якої біосистеми наведені дані?
4. Табл. 3.2.2. У таблиці є номери зразків (всього 20), але не вказано, що це за зразки, бо біосистем всього було 25. Те саме зауваження до таблиці 3.2.3.
5. Рис. 4.1.1 Біоелектрика рослинно-мікробних біосистем. Як розраховували середнє значення напруги в лісах? – середнє за 150 днів? Як отримували ґрунт без рослин? Чи містив ґрунт мікроорганізми? Аналізуючи результати, дисертантка стверджує, що саме лісові біосистеми продукують найбільше електрики, але рисунок 4.1.1. про це не свідчить – лісові біосистеми не відрізнялися за продукцією біоелектрики від садових і заболочених.
6. Стосовно аннелід – вони відомі як розрихлювачі ґрунту для доступу кисню – можливо звичайна просапка матиме той самий ефект?
7. Незрозуміло, чому вплив вологості міряли на різні дні експерименту – в одних експериментах на 70 і 72 день експерименту, а в інших на 81 і 89 день? Як вологість співвідносилася з погодними умовами? У який період реєстрували низьку вологість – 15%?
8. Немає чіткого пояснення, чому додавання сульфат-редукувальних бактерій стимулювало ріст частухи подорожникові та збереження довший час зеленої маси за сезонного коливання температур.
9. Наявні дрібні друкарські огріхи, русизми, англіканізми, невдалі фрази та терміни, хаотичне вживання хаотичне вживання скорочених і повних назв рослин. Щодо русизмів, наприклад: «круглорічно» замість «цілорічно», «плісневих грибів» замість «цвілевих грибів», «у порівнянні з» замість «порівняно з», «в залежності від» замість «залежно від», «дані бактерії» замість «ці бактерії», «слой ґрунту» замість «шар ґрунту» тощо. Замість $MgCl \cdot 6H_2O$ має бути $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, відсутність нижніх індексів у деяких хімічних сполуках – н-д, табл. 1.3. - $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ (має бути $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$). Друкарські огріхи - «ст.83, Подібна різниця продемонструвано», ст. 85 «Позитивну кореляція», ст. 94 «двома основними фактори». Некоректні сформульовані фрази – н-д, «Електроактивні мікроорганізми включають не лише модельні

екзоелектрогени, але і широкий ранг бактерій, в тому числі, протеобактерії і фірмікути, сульфатредуючі і ацетогенні, археї та еукаріоти». Археї та еукаріоти не належать до бактерій. З точки зору біології, термін «екосистема» по тексту вжитий не коректно. Не можна казати, н-д, екосистема дуба звичайного, бо екосистема – це широколистяний ліс, болото, ставок... - це ширше поняття. Краще вже вживати термін «біосистема».

10. Дисертантка вживає багато англіканізмів як у повних словах, так і скороченнях: що не дивно, враховуючи великий обсяг опрацьованих англійських літературних джерел більше п'яти сотень, проте доцільно вживати українські аналоги цих слів, як наприклад, «редують кисень» - відновлюють кисень, «PGA (plant growth area)» - площа росту рослини, PCR (polymerase chain reaction) – ПЛР (полімеразна ланцюгова реакція). MFC – Microbial Fuel Cell, мікробний паливний елемент. У дисертації є список скорочень на початку рукопису, але по тексту при першій згадці, зазвичай, одразу вживається скорочена назва, без розшифровки, хоча загальноприйнято, що аббревіатуру розшифровують при першій згадці. Деякі одиниці написано англійською мовою - mW/m^2 .

Зауваження, які виникли до рецензованої роботи, носять здебільшого дискусійний характер, а встановлені недоліки не применшують наукової цінності репрезентованого обсягу наукової інформації, повністю відображеного у публікаціях високого наукового рівня.

8. Відповідність докторської дисертації встановленим вимогам і загальні висновки

Дисертаційна робота Русин Ірини Богданівни на тему «Біотехнологічні основи отримання електрики у рослинно-мікробних біосистемах» є актуальною і завершеною науковою працею. Робота виконана особисто автором або під її керівництвом з дотриманням правил академічної доброчесності. Внесок інших осіб у виконання експериментів вказаний у підрозділах «Подяка» і чітко відображений у спільних публікаціях.

У дисертаційній роботі обґрунтовано нові наукові положення, які вирішують проблему біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики. Робота має практичну цінність, національне та світове значення та основні результати достатньо висвітлені у 65 наукових працях, з яких 10 статей у виданнях, включених до наукометричних баз Scopus та Web of Science (2 статті Q1, 1 стаття Q2), 15 статей у інших наукових фахових виданнях України та 2 статті у наукових періодичних виданнях України, а також, 3 патенти України на корисну модель.

На основі вказано вище вважаю, що дисертація повністю відповідає вимогам паспорту спеціальності 03.00.20 – біотехнологія та вимогам п. 7 та п. 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17.11.2021 р., а її авторка, Русин Ірина Богданівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора біологічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія.

Опонент

доктор біологічних наук,
професор
завідувач кафедри
біохімії та біотехнології
Прикарпатського національного
університету імені Василя Стефаника

Марія БАЙЛЯК

