

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. Ступінь актуальності теми дисертації

Інтенсивне використання традиційних джерел енергії та промислова діяльність спричинили погіршення екологічного стану навколишнього середовища у світовому масштабі, призвели до зростання емісії парникових газів (насамперед CO₂), збільшення ризику глобального потепління і кліматичних змін. Відповідно, до найважливіших завдань людства належить пошук і використання альтернативних відновлюваних джерел енергії та розробка енергоефективних технологій із скороченням викидів парникових газів. Отже, дисертаційна робота Русин Ірини Богданівни, подана на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія є актуальною і має велике практичне значення.

Багато країн заявляють про плани переходу до вуглецевої нейтральності, що зумовлює потребу розвитку екологічно безпечних технологій отримання електрики, так і збільшення озеленення. І перше, і друге поєднує в собі біотехнологія рослинно-мікробної біоелектрики, яку дисертантка обрала темою дисертаційного дослідження. Отримання рослинно-мікробної біоелектрики є дійсно екологічним, бо базується на застосуванні рослин, їхньої фотосинтетичної активності та здатності до виділення корневих ексудатів, що сприяють діяльності ризосферних мікроорганізмів. Розвиток біотехнології рослинно-мікробної біоелектрики сприяє додатковому озелененню, збільшенню зелених площ на дахах будівель, що є вагомим чинником у боротьбі із наслідками зміни клімату та викидами парникових газів. Тому, безперечно дисертаційна робота, в якій представлено нове

вирішення біотехнологічної проблеми рослинно-мікробних біосистем шляхом розроблення нових, ефективних та економічно вигідних підходів до цілорічного отримання біоелектрики в енергоефективних будинках є актуальною і значущою.

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації

Дисертаційна робота Русин І. Б. виконана на високому науковому рівні та є завершеною науково-дослідницькою працею. Аналіз змісту розділів, використаної сучасної і відповідної до поставлених завдань методології та застосування розроблених біосистем дає підстави зробити висновок про належну обґрунтованість винесених на захист основних наукових результатів. Результати опрацьовані методами варіаційної статистики. Достовірність висновків підтверджується насамперед використанням на практиці розроблених біосистем і великим обсягом обґрунтованих експериментальних досліджень. Під час детального аналізу дисертаційної роботи та автореферату не виявлено висновків або тверджень, які б викликали сумніви.

3. Відсутність порушення принципів академічної доброчесності.

Дисертація є самостійним науковим дослідженням, в якій відображені власні ідеї та напрацювання автора, що дало змогу вирішити поставлені у роботі завдання. Дисертаційна робота містить результати власних досліджень, положення і висновки, які логічно випливають із результатів експериментів та які дисертантка сформулювала особисто.

4. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Робота складається з дев'яти розділів: вступу, огляду літератури, опису використаних методів і умов експериментів та семи розділів результатів власних досліджень, висновків і списку використаних джерел наукової літератури.

В розділі 1 розглянуто основні біоелектричні принципи, загальна будова та перспективи рослинно-мікробних біосистем отримання біоелектрики.

Висвітлено значення угруповань мікроорганізмів та роль рослин і субстратів як основних факторів генерації біоелектрики. Схарактеризовано вплив зовнішніх чинників на біоелектричні параметри. Водночас визначено основні напрямки дослідження.

В розділі 2 дисертантка наводить опис структури розроблених біосистем і розташування їх у польових умовах та методів визначення досліджуваних показників.

В розділі 3 обґрунтовано оптимальну структуру біомодуля на основі досліджень впливу різних матеріалів, міжелектродної відстані, площі електродів та різних підключень для отримання рослинно-мікробної біоелектрики. На основі виявлених закономірностей розроблено ефективні дво- і три-модульні біосистеми як автономні джерела живлення для низькоенергоспоживаючих приладів, замінюючи батарейки 1.5 В та 3.0 В.

В розділі 4 проведено оцінку потенціалу різних біосистем як джерела біоелектрики в польових умовах: в екосистемах лісів та заболочених лук, агроекосистемах, міських екосистемах, зокрема, в паркових і лісопаркових зонах і техногенно забруднених газонах вздовж автотрас. Проаналізовано вплив забруднення важкими металами на здатність біосистем генерувати струм у сильно забруднених ґрунтах вздовж автотрас.

В розділах 5 і 6 досліджено біосистеми на основі двох альтернативних видів рослин, болотної рослини *Alisma plantago-aquatica* та посухостійкої трави *Festuca arundinacea* для енергоживлення приладів, які споживають 50-100 мА чи для LED-освітлення всередині будинків. Аналізується вплив росту рослин, температур приміщення та додавання сіркобактерій на біоелектричні параметри біосистем та можливості цілорічної експлуатації.

Результатом розділу 7 є розробка біосистем генерації біоелектрики для терас і балконів будинків на основі рослини *Caltha palustris* та вивчення впливу анелід *Lumbricus terrestris* як енхансерів, які підвищують генерацію біоелектрики біосистем. В розділах 8 і 9 обґрунтоване використання біосистем

на дахах будівель при порівнянні біосистем на основі мохів та осоки. У додатку наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Матеріали досліджень подані логічно, послідовно та доказово. Текст реферату відповідає змісту дисертаційної роботи.

Дисертація повністю відповідає паспорту спеціальності 03.00.20. – біотехнологія.

5. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Результати дисертаційної роботи є новими в науковому аспекті. Це перша робота у сфері рослинно-мікробних біосистем отримання біоелектрики в Україні. Автор роботи запропонувала низку нових біотехнологічних підходів і рішень задля отримання рослинно-мікробної біоелектрики. Ідеї використання сіркобактерій *Desulfovibrio* sp. та аннелід *Lumbricus terrestris* як біологічних енхансерів генерації біоелектрики біосистем є новими та оригінальними. Вони цілком обґрунтовані, оскільки свідчать про *Desulfovibrio* як електроактивну бактерію, її роль в міжклітинному транспорті електронів (раніше *Desulfovibrio* була відомою лише за участю в циклі сульфуру та нітрогенфіксації). Аннеліди продуктами своєї життєдіяльності створюють сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і рослин, тому можуть бути важливі в електрогенезі. Дисертантка отримала експериментальне підтвердження цих гіпотез, що відкрило шляхи до можливих біологічних способів підвищення ефективності біосистем за допомогою аннелід і бактерій.

Як відомо, проблемою рослинно-мікробної електрики є залежність її виходу від сезону. З літератури відомо про невдалі експерименти отримувати електрику на дахах через вимерзання рослин. Необхідно відзначити вдалий вибір дисертантки використати морозостійкі рослини: мохи та осоку, біосистеми на їхній основі мали стабільні біоелектричні параметрами після зимового періоду.

Дисертантка запропонувала нову електродну пару матеріалів, які не використовуються в інших біотехнологіях. Вперше показано сукупний вплив

на біоелектричні параметри редукції міжелектродної відстані і комбінацій з'єднань, які дали змогу вперше отримати компакту біосистему. Водночас у дисертації вперше розкрито потенціал природних екосистем та газонів вздовж автомагістралей за кліматичних умов заходу України як джерела поновлюваної біоелектрики.

6. Практичне значення результатів дисертаційної роботи

В дисертаційній роботі є низка важливих результатів, які зумовлюють практичне значення цієї роботи, деякі з них особливо важливі.

Практично цінною є ідея дисертанта використовувати техногенно забруднені та деградовані ґрунти для отримання рослинно-мікробної біоелектрики. Ці землі залишалися до цього часу поза увагою дослідників даної біотехнології. Це цікаве рішення, оскільки відомою є толерантність рослин і мікробних угруповань до поллютантів навколишнього середовища. Дисертантка виявила стійкість біосистем до забруднення, яке трапляється вздовж трас, та зниження генерації рослинно-мікробної біоелектрики при забрудненні ґрунту лише одночасно кількома важкими металами високого класу небезпеки, концентрація яких перевищувала ГДК більш ніж у 10 разів. Таке забруднення виявляється лише на невеликому сегменті зелених смуг вздовж автотрас поблизу світлофорів. Це має важливе практичне значення, оскільки біоелектрика рослинно-мікробних угруповань вздовж автотрас могла б забезпечувати придорожнє освітлення.

Практичне значення має також досліджена перспектива використання мохоподібних на дахах для отримання електрики, оскільки мохоподібні характеризуються стійкістю до ультрафіолетового випромінювання і можуть розвиватися на лімітованій площі.

Практичну цінність результатів дисертації підтверджує впровадження її результатів, а також використання їх під час виконання досліджень в інститутах та університетах Америки і Європи, а також отримання трьох патентів України на корисну модель.

7. Повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 65 наукових працях, з яких 1 розділ монографії та 27 наукових статей: 10 статей у виданнях, включених до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 15 статей у інших наукових фахових виданнях України, 2 статті в науково-періодичних виданнях України та 33 публікації у матеріалах конференцій та конгресів; 7 статей опубліковані у іноземних наукових журналах, з яких 3 статті у журналах Q1–Q2 кuartилів.

Аналіз наукових праць і тез доповідей на міжнародних конференціях показав, що в них у достатньому обсязі опубліковані всі основні результати дисертаційного дослідження, апробація проведена на належному рівні.

8. Відмічені наступні зауваження до дисертаційної роботи

Незважаючи на загальну позитивну оцінку дисертації, слід зазначити наступні зауваження:

1. В огляді літератури (підрозділ 1.5) автор наводить великий перелік видів рослин, які використовують у біосистемах для генерації біоелектрики. Варто було певним чином систематизувати цей перелік, розмістивши його у формі таблиці; при цьому доцільно було вказати назви родин, до яких належать розглянуті види рослин. Крім того, після видових назв рослин потрібно вказувати авторів (при першому згадуванні в тексті). Також варто було оформити в таблицю і згрупувати за родинами види рослин, які автор використала в експериментальній частині роботи.
2. В огляді літератури не варто описувати методи, наводити детальний склад середовищ (наприклад, на с. 77, с. 79). Крім того, в роботі трапляються неточності у цитуванні наукових джерел. Зокрема, автор вказує: «Сонячна енергія запускає світлову фазу хімічного синтезу АТР та пов'язано з ним темнову фазу фотосинтезу органічних сполук» і посилається на свою працю (Rusyn, 2016) (с. 114). Але цей

факт автор не встановила особисто, тому таке цитування некоректне. Разом з тим, у роботі відсутнє посилання на методи статистичного опрацювання результатів.

3. В розділі 2 «Методика досліджень ...» надто деталізований опис умов проведення експериментів (на думку рецензента, така деталізація є зайвою). Наприклад, під час вимірювання освітлення ділянки, вологості ґрунту тощо, зайвим є опис роботи приладу, за допомогою якого здійснювали вимірювання (с. 219). У цьому ж розділі під час опису території досліджень автор не врахувала той факт, що в 2020 р. проведено адміністративну реформу, внаслідок якої відбулися зміни в підпорядкуванні багатьох населених пунктів. Це стосується й сіл, в яких автор проводила дослідження. Зокрема, с. Волощина тепер належить не до колишнього Перемишлянського, а до Львівського району; с. Прилісне належить не до Маневицького, а до Камінь-Каширського району; с. Кульчин належить не до Турійського, а до Ковельського району.
4. У розділах, присвячених опису результатів досліджень, трапляються деякі неточності. Зокрема, на с. 268 розміщена таблиця без номера; у підрозділах 4.1 і 4.2 великі фрагменти присвячені аналізу літературних даних, зокрема, на с. 284–285 розміщені три таблиці з даними, які не належать до власних результатів автора (ці матеріали варто було помістити в розділі «Огляд літератури»).
5. На с. 316 автор вказує, що джерелом забруднення довкілля свинцем є автомобілі. Проте така ситуація була в другій половині ХХ ст., коли до моторного палива додавали тетраетилсвинець ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$). На сьогодні ж використання етилованого бензину заборонене в усіх країнах світу; в Україні використання етилованого бензину заборонене в 2003 р. Тому виникає запитання: чим зумовлене 10-кратне перевищення ГДК свинцю в ґрунті на території м. Львова?

Крім того, під час оцінки рівня забруднення ґрунту металами варто було визначити коефіцієнт (індекс) забруднення, що дало б змогу автору більш аргументовано стверджувати про високий, помірний або низький ступінь забруднення ґрунту.

6. В роботі автор часто використовує синонімічні назви видів рослин замість сучасних наукових назв. Зокрема, наукова назва рослини *Helxine soleirolii* – *Soleirolia soleirolii* (Req.) Dandy (автор помилково називає цей вид *Helcine soleirolii*); назва рослини *Scirpus validus* – *Schoenoplectus tabernaemontani* (C.C.Gmel.) Palla, назва рослини *Spartina anglica* – *Sporobolus anglicus* (C.E.Hubb.); назва рослини *Papyrus diffuses* – *Cyperus diffusus* Vahl та ін.
7. В тексті роботи є помилки та неточності в українських назвах рослин (наприклад, мох гіпн кипарисовий (*Hypnum cupressiforme*) автор називає кипарисовим лишайником; щитолісник (*Hydrocotyle verticillata*) – мухомором зефірним; осоку шорстковолосисту (*Carex hirta*) – осокою шершавою і осокою шершаволистою; рогіз південний (*Typha domingensis*) – рогозом кумбунгі; васильки справжні (*Ocimum basilicum* L.) – базиліком кімнатним; подорожник великий (*Plantago major* L.) – сухопутним подорожником; очерет звичайний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) – тростником південним і т.д. Рослину *Cyperus prolifer* автор називає папіросовидною осокою (с.103) і папірусом (с.123), але обидві назви некоректні; рослину *Alisma plantago-aquatica* автор у деяких розділах роботи називає водним подорожником, хоча українські назви рослини – частуха звичайна, частуха подорожникова. Крім того, в тексті роботи не дотримане правило, згідно з яким у разі використання і наукової (біноміальної), і української назв рослин, наукову назву потрібно вказувати в круглих дужках.

8. У дисертації трапляються помилки в класифікації організмів. Зокрема, рослина *Echinochloa glabrescens* належить до судинних рослин (родина Poaceae), а автор зараховує її до водоростей (с. 103). На с. 113 автор зазначає: «...еукаріоти: дріжджі і гриби». Але дріжджі також належать до грибів (це одноклітинні гриби). На с.146 зазначено: «вивчення ролі нових рослин серед гігрофітів, ксерофітів та мохів». Проте гігрофіти і ксерофіти – це групи рослин, які виділяють за їхнім стосунком до умов середовища (рівня вологи), а мохи (Bryophyta) – таксономічна група; серед представників Bryophyta є і гігрофіти, і ксерофіти.
9. У тексті роботи автор часто використовує термін «фітомікробіоценоз», який не є коректним. На думку рецензента, коректніше використовувати термін «рослинно-мікробне угруповання». Трапляються й інші некоректні терміни, наприклад, рослини заболочень, болотисті рослини, рослини свіжої води (с.105), консорціум ризосфера-грунт, абіотичний карбон, хіміоатрактанти (замість хемоатрактанти), окислення (замість окиснення), трав'янисті рослини (замість трав'яні рослини), дикий туризм (замість самостійний туризм), антиглобально-кліматичні зміни і т. д; автор часто використовує іншомовні терміни замість відповідних термінів українською мовою (наприклад, «трансфер», «метаболітні шатли»).
10. У тексті дисертації трапляються стилістичні та граматичні помилки, русизми, часто невірно вживаються знаки пунктуації. В окремих випадках трапляються граматичні помилки в назвах видів рослин (наприклад, *Cyprus involucratus* замість *Cyperus involucratus*, *Cynon*

Однак вказані зауваження не зменшують наукової значущості й практичної цінності результатів дисертаційної роботи Русин І.Б.

9. Висновок щодо відповідності докторської дисертації встановленим вимогам

За актуальністю дослідження, повнотою охоплення наукової проблеми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, достовірністю та ступенем обґрунтованості наукових положень і висновків, новизною та практичним значенням, повнотою викладення у наукових публікаціях, відсутністю порушень принципів академічної доброчесності дисертаційна робота Русин Ірини Богданівни на тему «Біотехнологічні основи отримання електрики у рослинно-мікробних біосистемах» повністю відповідає вимогам, що ставляться до докторських дисертацій пунктів 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою КМУ №1197 від 17.11.2021 р., а її автор Русин Ірина Богданівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора біологічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія.

Офіційний опонент
професор кафедри екології
Львівського національного університету
імені Івана Франка,
доктор біологічних наук, професор

Галина АНТОНЯК

