

ПЕРСПЕКТИВИ ОТРИМАННЯ БІОЕЛЕКТРИКИ В ПАРКОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ МІСТ

Русин І.Б.¹, Медведєв О.В.², Патлатюк О.Ю.¹

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79013, м. Львів
gib7@i.ua; mov2@ukr.net

²Філія Науково-дослідного інституту автомобілебудування «Еталон»
вул. Городоцька, 174, 79022, м. Львів

Представлено результати дослідження біоелектричного потенціалу, який генерують рослинно-мікробні угруповання міських паркових та лісопаркових екосистем. Моніторинг біоелектрики проводили *in situ* в паркових та лісопаркових зонах міста Львова із трав'яним покривом довкола дерев або з інтенсивно розвинутим нижнім ярусом у вигляді паростків молодих дерев та шару опалого листя довкола дерев, а також у паркових зонах з інтенсивним антропогенним навантаженням з відсутнім рослинним покривом довкола. Виявлено високі значення середнього біоелектричного потенціалу в лісопарках і парках міста, 1076.7 мВ і 1041.8 мВ, відповідно. У занедбаних паркових екосистемах із високим ступенем витоптування та переущільненим ґрунтом значення біоелектричного потенціалу не високі та склалися в середньому 861.2 мВ. Виявлено ефект зниження біоелектричного потенціалу рослинно-мікробної асоціації в міру віддалення від стовбура поодинокого ростучого дерева без супутнього трав'яного покриву чи листяного опадів. Зміни біоелектричного потенціалу є незначними з віддаленістю від стовбура дерева в густих насадженнях дерев із молодими паростками дерев та листяним опадом через формування майже безперервних оптимальних зон розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів завдяки секреції органічних продуктів фотосинтезу коренями паростків і віддаленими кореневими системами сусідніх дерев та продуктами розпаду органічного опадів. Стабільні протягом весняно-осіннього періоду значення біоелектрики рослинно-мікробних асоціацій ґрунту паркових та лісопаркових екосистем, що займають істотну частку від загальної площі міста і невеликою мірою залежні від зниження вологості розкривають перспективи використання їх як відновлювального джерела енергії. Подальша розробка електробіотехнології відкриває можливості екосистем урбанізованих територій паркових та лісопаркових зон міст як джерела зеленої енергії. *Ключові слова:* парки, лісопарки, біоелектрика, відновлювальна енергія.

Prospects of obtaining bioelectricity in urban parks. Rusyn I., Medvedev O., Patlatyuk O.

The article presents the results of the study of bioelectric potential generated by plant-microbial associations of ecosystems of urban parks and forest park zones. Bioelectricity monitoring was carried out *in situ* in park and forest areas of the city of Lviv with grass cover around trees or with intensively developed lower tier of sprouts of young trees and a layer of fallen leaves around trees, as well as in park areas with intensive anthropogenic loading without grass cover around. High values of the average bioelectric potential, 1076.7 mV and 1041.8 mV, were revealed in forest parks and city parks, respectively. In abandoned parklands with a high degree of trampling and over-compacted soil the bioelectric potential values were not high and averaged 861.2 mV. The effect of reducing the bioelectric potential of the plant-microbial association as the distance from the single-growing tree trunk without accompanying grass cover or leaf fall was detected. Changes in the bioelectric potential are insignificant with the distance from the tree trunk in dense tree plantations with young tree sprouts and deciduous litter through the formation of almost continuous optimal zones for the development of electro-generating microorganisms due to the secretion of organic photosynthesis products by root systems of neighboring trees, the directly root excretions of sprouts and the decay products of organic litter. Bioelectricity of plant-microbial soil associations was stable during the spring-autumn period in park and forest park zones, occupying a significant proportion of the city's total area and was slightly dependent on humidity reduction reveals prospects for their use as a sustainable energy source. Further development of electrobiotechnology opens the possibilities of ecosystems of urban areas of park and forest park zones of cities as a source of green energy. *Key words:* parks, forest parks, bioelectricity, renewable energy.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Отримання біоелектрики з рослинних екосистем є інноваційним способом альтернативної енергетики, що активно розвивається в останнє десятиліття [1]. Суть методу полягає у зборі біоелектрики, яку продукують ґрунтові електрико-генеруючі мікроорганізми, що живляться кореневими продуктами фотосинтезу рослин та продуктами розкладу листяного опадів за допомогою електродних систем, внесених у товщу ґрунту [2, 3]. Рослинні екосистеми боліт [4] і заболочених лісів [5] та рисових полів Японії та Індонезії [6–8] охарактеризовані як перспективні джерела рослинно-мікробної біоелектрики.

Зважаючи на значну частку від площі міст, яку займають паркові екосистеми, вони могли би слугувати важливим джерелом мікробно-рослинної біоелектрики, проте їхня біоелектро-продуктивність залишалася недослідженою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Парки є невід'ємною частиною кожного міста, як його біофільтри, важливі клімато-регулятори та місце рекреації городян [9; 10; 11]. Паркові насадження займають вагомий частину від загальної площі міст, так, наприклад, у м. Львові 4.4 тис. га заняті під паркові зони, що становить 26% від площі міста, у Києві – 5,5 тис. га (6,5%), у Харкові – 3,4 тис. га

(9,7%), у Варшаві (Польща) – 12,8 тис. га (25% від території міста). У сучасному містобудуванні під парки відводиться великі території через їхню вирішальну роль для здоров'я та самопочуття міських мешканців, враховуючи просторову доступність кожному [11; 12]. Значні території міських зелених зон, рівномірно розподілених на карті сучасних міст як інструментарій антиглобально-кліматичних змін, зможуть набути ще одного важливого значення та виступати альтернативним джерелом енергії і тим самим зменшувати CO₂-залежні енерговитрати, пов'язані з інфраструктурою парків. У разі розробки ефективних технологій рослинно-мікробна біоелектрика паркових зон могла би забезпечувати освітлення паркових територій та дитячих майданчиків, а в перспективі – живити точки доступу вай-фаю, служити для енергозабезпечення зон автономної роботи з ноутбуками, заряду мобільних телефонів, електросамокатів, енергозабезпечення інтерактивних лавок.

Дерева можуть виступати важливим індуктором розвитку прикореневої електрико-генеруючих мікроорганізмів. Надлишкові продукти фотосинтезу рослин, що виводяться кореневою системою в ґрунт, як і рослинний опад, виступають субстратами для розвитку бактерій, що продукують біоелектрику в ґрунтах [2; 3]. Тому ефективність збору біоелектрики довкола дерева може залежати від розташування його кореневої системи, яка зосереджена неглибоко та в горизонтальному напрямку зменшується по мірі віддалення від стовбура дерева. У поверхневому шарі ґрунту парків зосереджено до 70% всіх коренів клена гостролистого, берези бородавчатої, в'язи звичайного, до 80% коренів липи дрібнолистої, ясеня пухнастого [13; 14]. На відстані до 1,2 м від стовбура дерева локалізується основна маса кореневої системи, до 88% коренів у клена гостролистого, берези бородавчатої, в'язи звичайного, липи дрібнолистої та на відстані 1 м у ясеня пухнастого, хоча поодинокі горизонтальні корені можуть простягатися до 2–2,5 м у в'язи звичайного, берези бородавчатої, 3,5–4,5 м у клена гостролистого та липи дрібнолистої [13; 14]. Щоб перевірити дану гіпотезу нами було проведено наступні дослідження.

Метою даного дослідження було оцінити можливість використання міських парків та лісопарків як джерела рослинно-мікробної біоелектрики. Ми поставили перед собою завдання:

1. Проаналізувати біоелектричний потенціал міських парків із різним ступенем розвитку рослинного покриву довкола дерев: занедбаних паркових зон з ущільненим ґрунтом та із бідним або і взагалі відсутнім рослинним покривом довкола дерев, доглянутих парків із розвинутим трав'яним покривом довкола дерев та лісо-паркових екосистеми з інтенсивно розвинутим нижнім ярусом та молодими паростками дерев.

2. Оцінити біоелектропродуктивність ділянок довкола дерев залежно від віддалення від стовбура дерева як основного джерела субстратів для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів.

3. Проаналізувати сезонні коливання біоелектричного потенціалу протягом 6 місяців із квітня по вересень.

Методи дослідження. Об'єктом досліджень була біоелектрика мікробно-рослинних асоціацій 10 видів дерев, найбільш широко представлених у паркових екосистемах м. Львова та України [15; 16]: клен білий *Acer pseudoplatanus* L., граб звичайний *Carpinus betulus* L., ясен пухнастий *Fraxinus pubescens* L., бук лісовий *Fagus sylvatica* L., в'яз гладкий *Ulmus laevis* Pall., гірकोкаштан *Aesculus hippocastanum* L., липа серцеволиста *Tilia cordata* Mill., береза повисла *Betula pendula* Roth., тополя чорна *Populus nigra* L. та в'яз граболистий *Ulmus carpinifolia* Gled. Діаметр стовбурів дерев в середньому становив 0.41 м. Ґрунт біля дерев був вкритий газонною травою або шаром органічного опаду листя чи був повністю витоптаний і позбавлений трав'яного покриву. Вимірювання біоелектричного потенціалу проводилося з 30 зразками кожного виду дерев *in situ*.

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

Електроди розміщували стаціонарно у ґрунті протягом усього експерименту на відстані 0,5 – 3,0 м від стовбура дерева та глибині 0,3 – 0,4 м. Локалізація електродів у ґрунті зумовлена тим, що кореневі системи в умовах міських парків в основній масі зосереджені, подібно як і у лісах: не глибоко, у горизонті до 0,4 м [17]. Електроди розміщували в чотирьох різних напрямках від стовбура дерева через можливу асиметричність корневих систем [18]. Покази біоелектричного потенціалу реєстрували щоденно з квітня по вересень та обраховували їхнє середнє значення.

Для реєстрації біоелектричного потенціалу використовували розроблену нами моно-електродну систему [19] із графітових катодів, розміром 90 мм (висота) x 30 мм (ширина) x 15 мм (товщина) та оцинковано-стальних анодів, розміром 292 мм (висота) x 30 мм (ширина) x 0.8 мм (товщина) з під'єднаними до них полівінілхлорид-ізолюваними мідними дротами. Електродну систему розташовували стаціонарно на глибині у ґрунті, безпосередньо в зоні асоціації рослинного коріння та мікроорганізмів, де відбувається вивільнення електронів та протонів. Закінчення мідних дротів виводили на ґрунтову

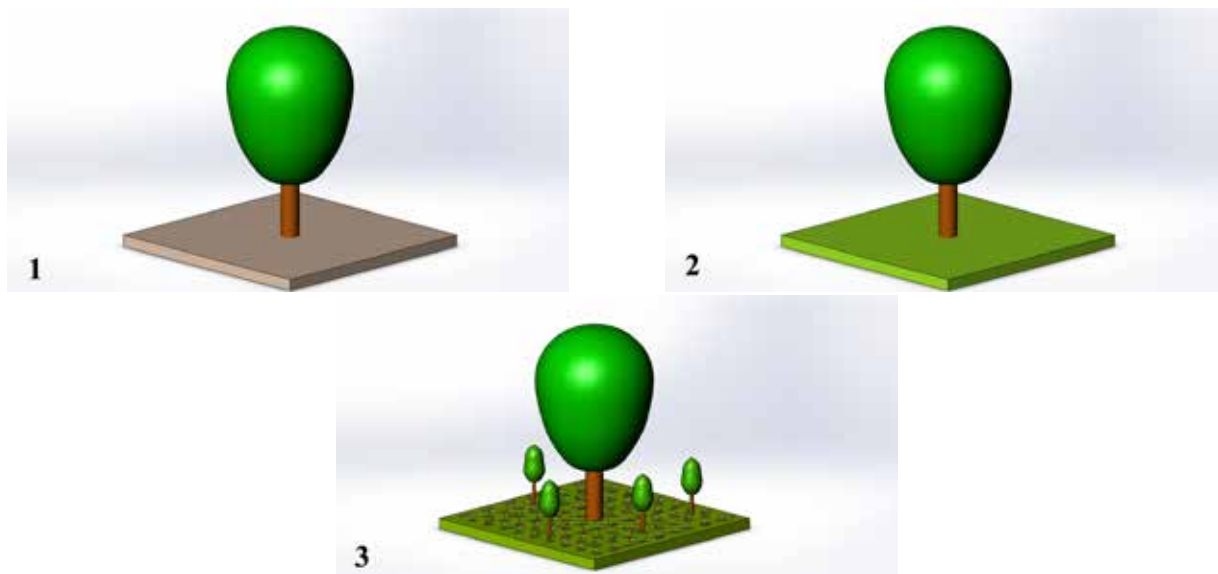


Рис. 1. Види експериментальних ділянок моніторингу біоелектричного потенціалу в паркових та лісопаркових зонах: 1 – ділянки з ущільненим ґрунтом та із бідним або і взагалі відсутнім рослинним покривом довкола дерев, 2 – ділянки з розвинутим трав'яним покривом довкола дерев, 3 – лісопарковій екосистемі з інтенсивно розвинутим нижнім ярусом та молодими паростками дерев

поверхню. За допомогою цифрового мультиметра, щупи якого закріплювали на дротах, що виходили на поверхню з глибини субстрату, знімали покази біо-

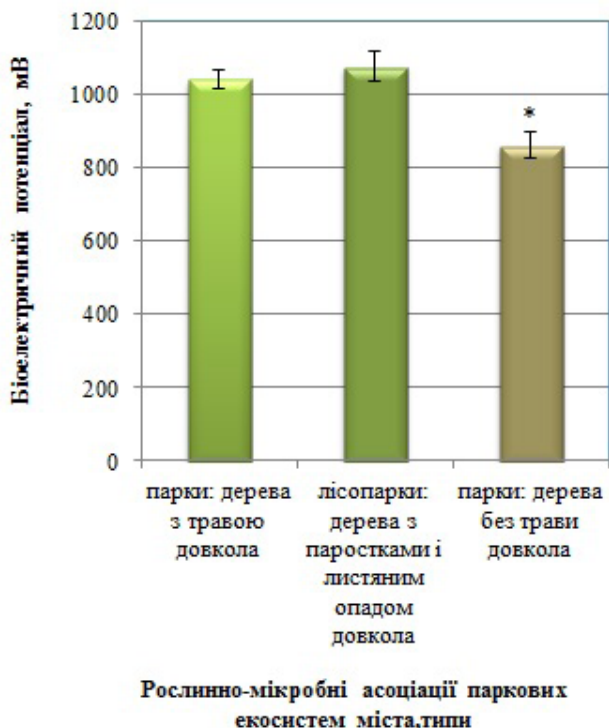


Рис. 2 Середній біоелектричний потенціал мікробно-рослинних асоціацій міських паркових та лісопаркових зон протягом 6 місяців спостережень ($\bar{x} \pm SE$, $n=30$)

* Біоелектричний потенціал біля дерев із витоптаним ущільненим ґрунтом істотно відрізняється від потенціалу біля дерев із трав'яним покривом довкола, а також лісопаркових екосистем ($P < 0.05$).

електричного потенціалу. Зазначені в роботі результати представлені як середні значення для всіх повторюваних експериментів та їх стандартні похибки ($\bar{x} \pm SE$). Статистичну оцінку істотності різниці між середніми значеннями було обраховано за допомогою F-тесту для 95% рівня достовірності.

Виклад основного матеріалу. Проведені дослідження в паркових та лісопаркових екосистемах показали достатньо високі показники значень біоелектричного потенціалу. У лісопаркових зонах із розвинутим нижнім ярусом рослинності – численними паростками молодих дерев та шаром листяного опаду – зафіксовані найвищі значення біоелектричного потенціалу – 1076.7 мВ, що були дещо вищі від екосистем паркових дерев із трав'яним покривом ($p > 0.516$) та істотно відрізнялися від паркових зон із витоптаною травою ($P < 0.05$) (рис. 2). Середній біоелектричний потенціал найбільш поширених у парках мікробно-рослинних асоціацій дерев із розвинутим трав'яним покривом довкола них становив 1041.8 мВ (рис. 2). Сукупний вплив корених виділень дерев і трав створює оптимальні умови для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів у паркових зонах без антропогенного навантаження. Зімкнутість крон дерев, що не допускають активного випаровування вологи, так важливої для розвитку електро-активних мікроорганізмів, сукупний вплив корених систем молодих та материнських дерев, розвиток мікоризи, ефект листяного опаду забезпечують сприятливі умови для генерації біоелектричного потенціалу в лісопаркових зонах міст.

Важливою екологічною проблемою парків України є витоптування їхніх територій, таких як землі займають до 10% в багатьох парках України [15; 16]. Щоб з'ясувати, чи можуть витоп-

тані ґрунти в парках виступати джерелом енергії, ми провели дослідження електропродуктивності таких зон спресованого переущільненого ґрунту біля дерев без трав'яного покриву. Водночас такі ділянки є зручним об'єктом для вивчення впливу на генерацію біоелектрики виключно корневих виділень дерев за умов відсутності іншого рослинного покриву та листяного опадів. У середньому покази біоелектричного потенціалу зон з інтенсивним антропогенним навантаженням є значно нижчими, 861.2 мВ, ніж зафіксовані в паркових екосистемах з трав'яним покривом та лісопаркових зонах ($P < 0.05$) (рис. 2). Величина біоелектричного потенціалу екосистем із спресованим ґрунтом відрізняється на 180.6 мВ та 215 мВ від паркових екосистем з неущільненим ґрунтом та розвинутим нижнім ярусом рослинності ($P < 0.05$). Переущільненість ґрунту є негативним фактором для розвитку електро-активних мікроорганізмів, оскільки таким ґрунтам властивий порушений аеро-вологообмін.

Максимальні середні значення біоелектричного потенціалу в цих умовах, 948,9 мВ, є отримані на відстані 0,5 – 1,5 м від стовбура дерев, далі із віддаленням від стовбура до 3 м – біоелектричний потенціал падає на 125,8 мВ, незважаючи на однакові умови спресованості, вологості, рН ґрунту (рис. 3). Це підтверджує вирішальну роль корневих виді-

лень дерев для життєдіяльності електрико-продукуючих мікроорганізмів, оскільки основна сукупність горизонтальної кореневої системи зосереджена на відстані до 1 – 1.5 м від стовбура, а з її подальшим різким зниженням зникають сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів [13; 14]. Ущільнений ґрунт із пошкодженим аеро-водним режимом та утрудненим внутрішньоґрунтовим транспортом речовин гальмують продукування біоелектрики у витоптаних зонах парків міст.

Динаміка зміни біоелектричного потенціалу в міру віддаленості від стовбура дерева із трав'яним покривом залежить від наявності дерев довкола та супутнього нижнього рослинного покриву. У парках із деревами та трав'яним покривом довкола найвищі значення спостерігаються на віддалі 0,5 – 1,5 м. Із подальшим віддаленням від стовбура дерева значення біоелектричного потенціалу дещо спадають і знову зростають на відстані 3 м, очевидно, через приєднання органічних виділень горизонтальних корневих систем суміжних дерев (рис. 3). Збільшення концентрації корневих систем веде до максимізації органічних виділень, необхідних для розвитку ґрунтових електро-активних мікроорганізмів. Так, наприклад, біоелектричний потенціал мікробно-рослинної паркової асоціації липи серцеволистої *T. cordata* з газонною травою довкола на

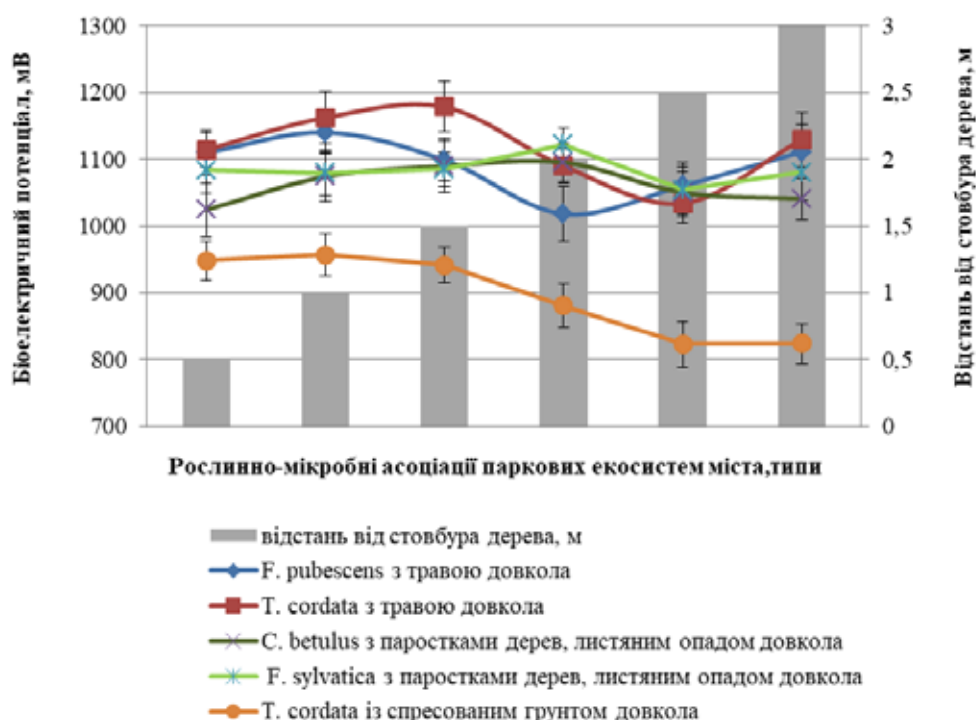


Рис. 3. Зміна значень біоелектричного потенціалу рослинно-мікробних асоціацій дерев паркових екосистем за віддаленості від стовбура дерева ($\bar{x} \pm SE$, $n=30$)

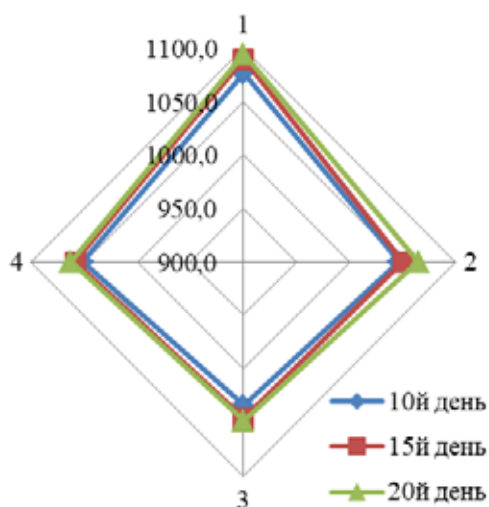
Примітка: біоелектричний потенціал знижується по мірі віддалення від позначки 1,0-1,5 м від стовбура дерева та знову зростає за наявності поруч інших дерев. У лісопаркових екосистемах із паростками дерев та опалим листям зміни біоелектричного потенціалу незначні із віддаленістю від стовбура.

відстані 0,5 – 1,5 м від стовбура дерева становить 1114,5 – 1178,5 мВ, із подальшим віддаленням від стовбура дерева знижується на 88,9 мВ на віддалі 2 м та ще на 55,4 мВ на віддалі 2,5 м від стовбура та знову зростає на віддалі 3 м на 95,3 мВ (рис. 3).

Екосистеми лісопаркових зон характеризуються більш складною картиною зміни біоелектричного потенціалу в міру віддаленості від стовбура дерева, ймовірно, через вплив кореневих виділень паростків молодих дерев, розташованих довкола стовбура материнського дерева (рис. 3). Найвище значення біоелектричного потенціалу зареєстровано на відстані

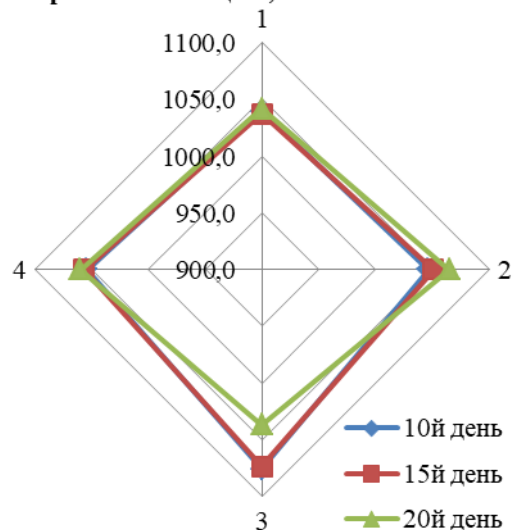
1,5 м від стовбура дерева та становить 1392.1 мВ, а мінімальне – на відстані 2,5 м від стовбура дерева та складає 984,5 мВ. У більшості напрямків від дерева, незалежно від відстані від стовбура дерева, спостерігаються невеликі коливання біоелектричного потенціалу, очевидно, через вплив паростків молодих дерев та лісового опаду, розподілених по довколiшній площі, та зростання в точках розташування паростків. Так, наприклад, коливання біоелектричного потенціалу з відстанню від стовбура рослинно-мікробної густо насадженої лісопаркової асоціації бука лісового *F. sylvatica* та граба звичай-

Біоелектричний потенціал, мВ



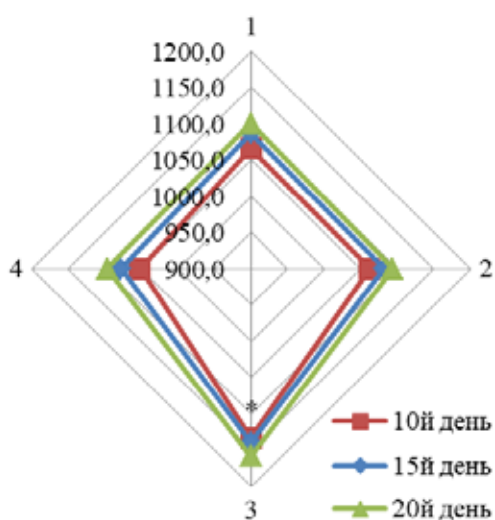
A

Біоелектричний потенціал, мВ



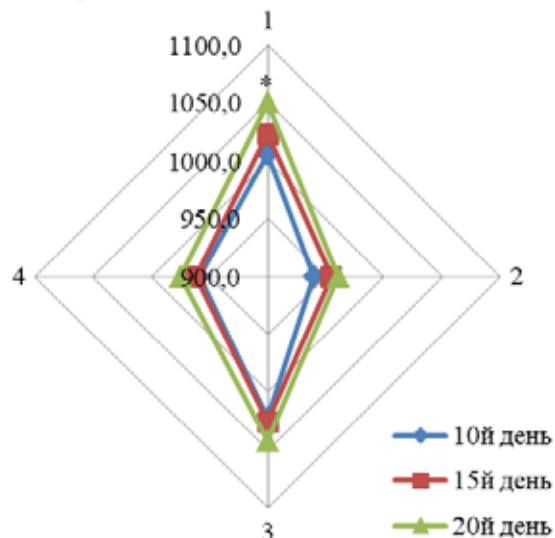
B

Біоелектричний потенціал, мВ



C

Біоелектричний потенціал, мВ



D

Рис. 4. Середні значення біоелектричного потенціалу фіто-мікробіоценозів у 4 протилежних напрямках довкола дерев 10-го, 15-го і 20-го дня експерименту ($\bar{x} \pm SE$, $n=20$)

Примітка: середні значення біоелектричного потенціалу рослинно-мікробних асоціацій *F. pubescens* (A) та *T. cordata* 1 (B) є близькими у всіх 4 напрямках довкола дерева, а різниця в межах однієї екосистеми статистично незначима ($p > 0.286$). *Асиметрія біоелектричного потенціалу вздовж 3-го напрямку від дерева *A. pseudoplatanus* на 10-й день експерименту (C) та 1-го і 3-го напрямків від дерева *T. cordata* 2 (D) 10-го і 20-го дня експерименту є статистично суттєвою в порівнянні з іншими напрямками ($P < 0.05$)

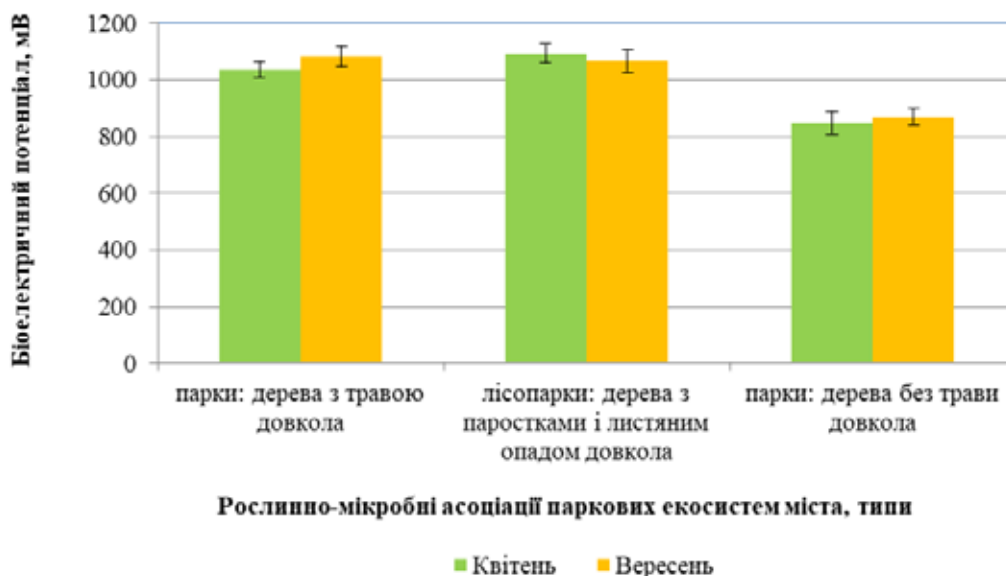


Рис. 5 Середній біоелектричний потенціал рослинно-мікробних асоціацій паркових та лісопаркових екосистем у квітні та вересні ($\bar{x} \pm SE$, $n=30$)

Примітка: сезонні зміни рівня біоелектричного потенціалу є статистично несуттєвими ($P > 0,05$).

ного *C. betulus* із паростками дерев та листяним опадом становить лише 67,5 – 71,2 мВ, у той час як у паркових екосистемах із рідко насадженими деревами ясена пухнастого *F. pubescens* і липою серцеволистою *T. cordata* та газонною травною коливання вольтажу складає 122,4 – 144,3 мВ (рис. 3). У деяких напрямках від дерева прослідковується картина спадання та наступного зростання біоелектричного потенціалу в максимальній віддаленості від стовбура дерева, через, очевидно, приєднання кореневих виділень сусідніх дерев.

У процесі аналізу даних середнього біоелектричного потенціалу рослинно-мікробних асоціацій паркових дерев у 4 різних взаємно протилежних напрямках довкола стовбура в частини зразків виявлена його асиметрія, що зберігається в часі або особливо посилюється в несприятливих умовах вологості, освітлення тощо (рис. 4). У частини екосистем у той самий день, у двох чи трьох напрямках від дерева середні значення біоелектричного потенціалу є близькими із статистично несуттєвими коливаннями, проте в одному чи двох напрямках значення значно відрізняються від значень, отриманих в інших напрямках. Даний факт може бути зумовлений як асиметрією кореневої системи в одному чи двох напрямках, так і впливом корневих систем сусідніх дерев, органічні виділення яких сумуються та інтенсифікують розвиток електро-активних мікроорганізмів. В інших екосистемах паркових дерев значення середнього біоелектричного потенціалу статистично несуттєво коливаються в усіх чотирьох напрямках довкола стовбура дерева.

Так, наприклад, середній біоелектричний потенціал є майже однаковим в усіх 4 напрямках від стовбура дерева *F. pubescens* та несуттєво відрізняється

по різних напрямках ($p > 0,255$): на 4.9 – 29.9 мВ 10-го дня експерименту, на 4.7 – 38.4 мВ на 15й день експерименту, на 1.9 – 28.9 20го дня експерименту, тобто, аналогічна динаміка зберігається у часі (рис. 4А). Подібна симетрія біоелектричного потенціалу довкола *T. cordata* 1, різниця між біоелектричним потенціалом довкола дерева в різних напрямках несуттєва і становить 7.0 – 29.7 мВ ($p > 0,316$) (рис. 4 В).

Довкола *A. pseudoplatanus* спостерігається зовсім інша картина. Середній біоелектричний потенціал між 1им, 2им та 3им напрямками довкола дерева відрізняється незначно: на 13,7 – 23,3 мВ 10-го дня експерименту, на 4,0 – 7,9 мВ 15го дня експерименту і на 3.2 – 6.5 мВ на 20-й день експерименту. Але різниця між середнім біоелектричним потенціалом 4-ого напрямку і середніми по інших трьох напрямках є більше, як на 60 мВ та складає 81.3 мВ ($P < 0,05$), 62.4 мВ ($p > 0,885$), 65.3 мВ ($p > 0,927$) на 10-й, 15-й і 20-й день експерименту, відповідно (рис. 4С). Аналогічна асиметрія біоелектричного потенціалу відмічається довкола *T. cordata* 2 (рис. 4D). Середній біоелектричний потенціал в двох напрямках від дерева складає 955.1 та 965.1 мВ, і різняться не суттєво що 5 днів, в межах 8.7 – 13.9 мВ, в двох інших напрямках середній біоелектричний потенціал 1026.2 та 1030.2 мВ, з 5-денною різницею в межах 3.2 мВ – 27.2 мВ. Різниця між середнім біоелектричним потенціалом 1-2 напрямку та 3-4 напрямку від дерева складає 82.9 мВ ($P < 0,05$), 71.1 мВ ($p > 0,940$), 89.3 мВ ($P < 0,05$) на 10-й, 15-й і 20-й день експерименту, відповідно.

Сезонні коливання біоелектричного потенціалу в паркових зонах є незначними. Протягом першого тижня після інтеграції в ґрунт електродів для збору біоелектрики зафіксовано зростання показників біо-

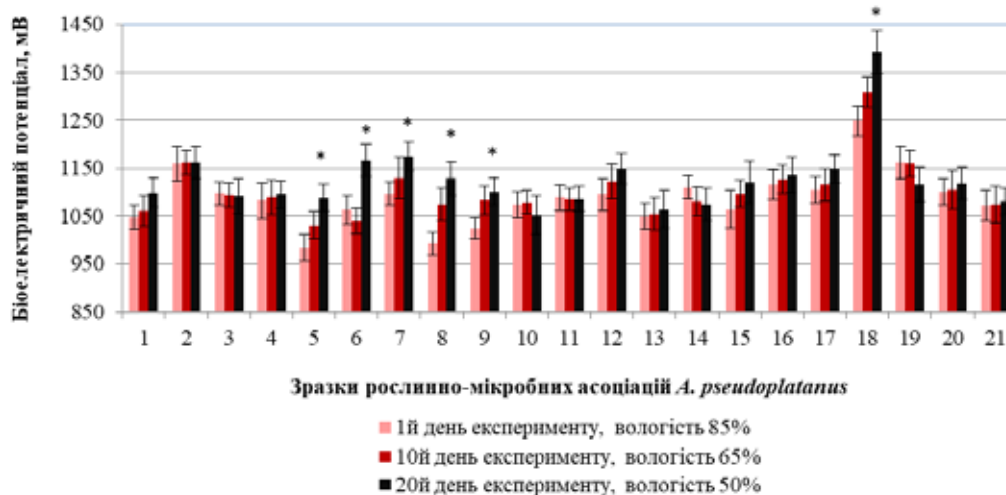


Рис. 6. Вплив зниження вологості ґрунту від 85% до 50% протяжі 20 днів експерименту на генерацію біоелектричного потенціалу 21 мікробно-рослинних асоціацій *A. pseudoplatanus* паркової екосистеми ($\bar{x} \pm SE$, $n=20$)

* Зростання рівня біоелектричного потенціалу із зниженням вологості є статистично суттєвою у зразків 5-9 та 18 ($P < 0,05$)

електричного потенціалу, а далі показники залишаються стабільними з невеликими коливаннями, протягом всього експерименту, що, очевидно, залежить від фотосинтетичної активності рослин, рівня корневих виділень, метеорологічних факторів (рис. 5).

Початкове зростання значень біоелектричного потенціалу в даному випадку може бути як результатом осадки ґрунту, що веде до більш щільного контакту електродів із ґрунтом, так і наслідком колонізації електродів мікроорганізмами, адже у природі електро-активні мікроорганізми прикріплюються до різноманітних матеріалів за допомогою клейких речовин та формують нановолокна, через які передають електрони [20]. Середньо-місячний біоелектричний потенціал у квітні та вересні статистично суттєво не відрізняється, різниця становить від 21,5 мВ до 48,6 мВ ($p > 0,683$, $p > 0,383$, $p > 0,311$) (рис. 5).

Паркові екосистеми формують сприятливий режим вологості для розвитку електрико-генеруючих мікроорганізмів. Втрата вологи в паркових зонах є мінімальною порівняно з відкритими газонами через зімкнутість крон, що запобігають випаровуванню. Проте під час посушливої погоди і в цих зонах відбувається зниження вологості ґрунту, що може несприятливо вплинути на розвиток фіто-мікробіоценозу. Але зниження вологості від оптимальних 85% до 50% за однакових умов освітлення 800 Люкс та температури 21,5°C протягом 20 днів експерименту має істотний пригнічуючий вплив на біоелектричний потенціал лише невеликої кількості рослинно-мікробних асоціацій паркових екосистем. У більшості зразків при зниженні вологості біоелектричний потенціал залишається на такому ж рівні із статистично неістотними коливаннями ($p > 0,193$) або навіть суттєво зростає ($P < 0,05$) (рис. 6).

Так, наприклад, з 21 проаналізованих мікробно-рослинних асоціацій *A. pseudoplatanus* паркової екосистеми біоелектричний потенціал у 9 фіто-мікробіоценозів був без істотних коливань, зміна потенціалу становила 3 – 21 мВ ($p > 0,193$), у 3 зразків біоелектричний потенціал падав на від -6 до -45 мВ ($p > 0,540$). У 9 мікробно-фітоценозів спостерігалось зростання біоелектричного потенціалу, що становило від 44 – 54 мВ ($p > 0,733$) до 77 – 143 мВ ($P < 0,05$) (рис. 6). Даний факт відсутності пригнічення генерації біоелектричного потенціалу при зниженні вологості пов'язаний із акумуляцією вологи потужними деревами та активними фотосинтезом рослин та, відповідно, інтенсивними корневими виділеннями, що стимулюють ріст електро-активних мікроорганізмів.

Головні висновки. Розкрито потенціал екосистем міських паркових та лісопаркових зон як джерела біоелектрики, що характеризуються стабільною генерацією біоелектричного потенціалу протягом весняно-осіннього періоду. Паркові зони, що підпадають під інтенсивне антропогенне навантаження, не можуть використовуватися як джерело зеленої енергії, середні значення біоелектричного потенціалу в цих умовах спостерігаються невисокі. Ураховуючи виявлене явище асиметрії середнього біоелектричного потенціалу мікробно-рослинних асоціацій довкола дерев та точки максимальної генерації біоелектричного потенціалу на певній відстані від стовбура дерева, можна більш ефективно використовувати їх як джерело зеленої енергії. Подальше вдосконалення біотехнології відкриває перспективи експлуатації паркових та лісопаркових екосистем міста як джерела відновлюваної екологічної енергії.

Література

1. Nitorisavut R., Regmi R. Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 76. P. 81–89. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.064.
2. Strik D.P.B.T.B., Hamelers H.V.M., Snel J.F.H., Buisman C.J. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*. 2008. Vol. 32, № 9. P. 870–876. doi:10.1002/er.1397.
3. Timmers R.A., Rothballer M., Strik D.P.B.T.B., Engel M., Schulz S., Schlöter M., Hartmann A., Hamelers B., Buisman C. Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology & Biotechnology*. 2012. Vol. 94, № 2. P. 537–548. doi: 10.1007/s00253-012-3894-6.
4. Wetser K., Liu J., Buisman C.J.N., Strik D.P.B.T.B. Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass & Bioenergy*. 2015. Vol. 83. P. 543–550. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.006.
5. Dai J., Wang J.-J., Chow A.T., Conner W.H. Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells. *Global Change Biology Bioenergy*. 2015. Vol. 7. P. 244–252. doi: 10.1111/gcbb.12117.
6. Kouzuma A., Kasai T., Nakagawa G., Yamamuro A., Abe T., Watanabe K. Comparative metagenomics of anode-associated microbiomes developed in rice paddy-field microbial fuel cells. *PLOS One*. 2013. Vol. 8, № 11, e77443. P. 1–10. doi:10.1371/journal.pone.0077443.
7. Ueoka N., Sese N., Sue M., Kouzuma A., Watanabe K. Sizes of Anode and Cathode Affect Electricity Generation in Rice Paddy-Field Microbial Fuel Cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2016. Vol. 6, № 1. P. 10–15. doi: 10.4236/jsbs.2016.61002.
8. Sudirjo E., de Jager P., Buisman C.J.N., Strik D.P.B.T.B. Performance and Long Distance Data Acquisition via LoRa Technology of a Tubular Plant Microbial Fuel Cell Located in a Paddy Field in West Kalimantan. *Indonesia Sensors*. 2019. Vol. 19, № 4647. P. 1–18. doi:10.3390/s19214647.
9. Русин І.Б. Урбоекологія. Львів, 2013. 115 с.
10. Bertram C., Rehdanz K. The role of urban green space for human well-being. *Ecological Economics*. 2015. Vol. 120. P. 139–152. doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.10.013.
11. Karade R.M., Kuchi V.S., Salma Z. The Role of Green Space for Sustainable Landscape Development in Urban Areas. *International Archive of Applied Science & Technology*. 2017. Vol. 8. P. 76–79. doi:10.15515/iaast.0976-4828.8.2.5154.
12. Huseynov E.F. Planning of sustainable cities in view of green architecture. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 21. P. 534–542. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2048.
13. Day S.D., Wiseman P.E., Dickinson S.B. & Harris J.R. Arboriculture & Urban Forestry. *Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees*. 2010. Vol. 36, № 4. P. 149–159.
14. Moore G.M. Managing Urban Tree Root Systems. *Proceedings of the 20th National Street Tree Symposium*. (Adelaide, 5-6 September 2019). Adelaide, 2019. P. 1–7.
15. Федоровський В.Д., Терлига Н.С., Юхименко Ю.С., Данильчук О.В., Данильчук Н.М., Лаптева О.В. Видовий склад та життєвий стан деревно-чагарникової рослинності парків та скверів м. Кривий Ріг. *Інтродукція рослин*. 2013. Т. 3. С. 73–79.
16. Денисюк Н. Аналіз стану зелених насаджень парку молоді міста Рівне. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки, Серія: Біологічні науки*. 2018. Т. 8, № 381. С. 33–39. doi:10.29038/2617-4723-2018-381-33-39
17. Watson G.W., Neely D. The Landscape Below Ground. *Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils*. (Illinois, September 30–October 1, 1993). Illinois, 1994. P. 1–5.
18. Ganatsas P., Spanos I. Root system asymmetry of Mediterranean pines. *Plant and Soil*. 2005. Vol. 278. P. 75–83. doi: 10.1007/978-1-4020-5593-5_12.
19. Русин І.Б., Медведєв О.В. Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту: пат. 112093 Україна: МПК 2016.01, H05F 7/00, H01M 8/16; заявл. 9.03.2016; опубл. 12.12.2016. Бюл. № 23. 5 с.
20. Lovley D.R., Ueki T., Zhang T., Malvankar N.S., Shrestha P.M., Flanagan K.A., Aklujkar M., Butler J.E., Giloteaux L., Rotaru A.E., Holmes D.E., Franks A.E., Orellana R., Risso C., Nevin K.P. Geobacter: the microbe electric's physiology, ecology, and practical applications. *Advances in Microbial Physiology*. 2011. Vol. 59. P. 1–100. doi: 10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5.