

МОРФО-ФІЗІОЛОГІЧНІ РЕАКЦІЇ РОСЛИН НА ТЕХНОГЕННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ: СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ

Зозуля Я. О., Григорчук І. Д.

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32300, м. Кам'янець-Подільський
bioldf25.zozulia@kpnu.edu.ua, hryhorchuk@kpnu.edu.ua

Дослідження присвячене комплексному аналізу сучасних наукових даних щодо морфо-фізіологічних реакцій рослин на техногенні електромагнітні поля (ЕМП), які формуються об'єктами енергетичної інфраструктури, телекомунікаційним обладнанням та іншими джерелами антропогенного випромінювання. Узагальнено результати експериментальних досліджень, що охоплюють широкий діапазон частот – від наднизькочастотних магнітних полів до радіочастотних сигналів мобільного зв'язку. Показано, що вплив ЕМП може зумовлювати різноспрямовані зміни морфологічних параметрів рослин, у тому числі кореневої системи, стебла, ростові процеси, проростання та формування фотосинтетичного апарату. Особлива увага приділена фізіологічним та біохімічним реакціям, серед яких варто відзначити активацію або пригнічення антиоксидантної системи, виникнення оксидативного стресу, зміни пігментного комплексу та функціонування фотосинтетичних комплексів. Проаналізовано молекулярні механізми дії ЕМП, включаючи зміни експресії генів, регуляцію стрес-індукованих сигнальних шляхів, участь ROS-залежної сигналізації та можливі зміни у роботі ферментних систем. Виявлено низку малодосліджених аспектів, серед яких – кумулятивні та комбіновані ефекти електромагнітного впливу у поєднанні з іншими стресорами: посухою та температурними коливаннями. Підкреслено недостатність довготривалих польових досліджень, що обмежує можливість перенесення лабораторних результатів на умови природних та агроєкосистем. Узагальнені у статті дані можуть слугувати науковою основою для створення та вдосконалення методів біоіндикації електромагнітного забруднення, уточнення екологічних нормативів і критеріїв безпечного рівня техногенного ЕМП, а також для оптимізації агротехнологічних підходів у регіонах із підвищеним електромагнітним навантаженням. Отримані результати є цінним підґрунтям для подальших фундаментальних досліджень у галузі радіоботаніки, стрес-фізіології рослин та екологічної токсикології. *Ключові слова:* рослини, електромагнітні поля, морфо-фізіологічні реакції, адаптація, фітоіндикація.

Morpho-physiological reactions of plants to man-generate electromagnetic fields: current state of research. Zozulya Ya., Hryhorchuk I.

The study is devoted to a comprehensive analysis of modern scientific data on the morpho-physiological reactions of plants to man-made electromagnetic fields (EMF) generated by energy infrastructure facilities, telecommunications equipment and other sources of anthropogenic radiation. The results of experimental studies covering a wide range of frequencies are summarized – from ultra-low frequency magnetic fields to radio frequency signals of mobile communications. It is shown that the impact of EMF can cause multidirectional changes in the morphological parameters of plants, including the root system, stem, growth processes, germination and formation of the photosynthetic apparatus. Particular attention is paid to physiological and biochemical reactions, among which it is worth noting the activation or inhibition of the antioxidant system, the occurrence of oxidative stress, changes in the pigment complex and the functioning of photosynthetic complexes. The molecular mechanisms of EMF action were analyzed, including changes in gene expression, regulation of stress-induced signaling pathways, participation of ROS-dependent signaling, and possible changes in the work of enzyme systems. A number of poorly studied aspects were identified, including cumulative and combined effects of electromagnetic influence in combination with other stressors: drought and temperature fluctuations. The insufficiency of long-term field studies was emphasized, which limits the possibility of transferring laboratory results to the conditions of natural and agroecosystems. The data summarized in the article can serve as a scientific basis for the creation and improvement of methods for bioindication of electromagnetic pollution, clarification of environmental standards and criteria for a safe level of technogenic EMF, as well as for the optimization of agrotechnological approaches in regions with increased electromagnetic load. The results obtained are a valuable basis for further fundamental research in the field of radiobotany, plant stress physiology, and environmental toxicology. *Keywords:* plants, electromagnetic fields, morpho-physiological reactions, adaptation, phytoindication.

Постановка проблеми. Швидкий розвиток технологій та активні процеси індустріалізації протягом останніх кількох десятиліть призвели до істотного зростання техногенних електромагнітних полів (ЕМП). Електромагнітні поля – це фізичні поля, що створюються електрично зарядженими об'єктами, що охоплюють широкий спектр від полів надзви-

чайно низької частоти, таких як ті, що генеруються лініями електропередач, до радіочастотних та мікрохвильових полів, що випромінюються бездротовими комунікаційними пристроями та радіолокаційними системами [2, 4, 11]. Електромагнітні поля стали невід'ємною частиною сучасного середовища. Тому все більше уваги на сьогоднішній день приділяється

вивченню впливу електромагнітних полів на живі організми, зокрема на рослинний світ. Техногенні електромагнітні поля відрізняються від природних як інтенсивністю, так і частотним складом, часто піддаючи рослини умовам, що виходять за межі їхнього еволюційного досвіду. Величина та тривалість впливу електромагнітних полів є критичними параметрами, оскільки як гострі високоінтенсивні, так і хронічні поля низької інтенсивності пов'язані з біологічними ефектами [1–4, 9, 11]. Сучасні дослідження свідчать, що електромагнітні поля нетеплової інтенсивності здатні впливати на фундаментальні процеси життєдіяльності рослин, включаючи проростання насіння, морфогенез, фотосинтетичну активність, водний баланс та стресостійкість.

Актуальність дослідження. Рослинний покрив є первинною ланкою біосфери та чутливим індикатором змін у середовищі існування, тому вивчення адаптації рослин у відповідь на дію електромагнітних полів, потребує особливої уваги. Морфофізіологічні реакції рослин на їх дію можуть виступати інтегральними показниками екологічного стану територій, дозволяючи оцінювати як безпосередній вплив техногенних чинників, так і загальний рівень антропогенного навантаження. Дослідження морфофізіологічних адаптацій рослин забезпечує не лише теоретичний внесок у розуміння механізмів впливу електромагнітних полів на живі організми, але й має прикладне значення для біоіндикаційного моніторингу стану довкілля та розробки природоохоронних заходів. Проблема полягає в тому, що ефекти техногенних електромагнітних полів є суперечливими, значною мірою залежними від експериментальних умов і впливають на рослинні організми на різних рівнях – від клітинного до організмowego [16].

Оцінка впливу техногенних електромагнітних полів на рослинність має ключове значення для екологічної безпеки, агроєкології, біоіндикації та охорони довкілля. Зростання антропогенного електромагнітного навантаження потребує систематизації сучасних досліджень для визначення потенційних ризиків, оцінки механізмів біологічної відповіді та розроблення рекомендацій щодо зменшення негативного впливу на природні та агроєкосистеми.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлений аналіз спрямований на розв'язання як фундаментальних наукових питань, так і практичних завдань, пов'язаних із збереженням стійкості та продуктивності екосистем в умовах зростання техногенного електромагнітного навантаження. У роботі здійснено систематизацію відомостей щодо впливу різних типів і параметрів електромагнітних полів на рослини та інтеграцію морфологічних, фізіологічних, біохімічних та молекулярних аспектів реакцій рослин, що є необхідною умовою для формування цілісного уявлення про механізми дії ЕМП у біологічних системах.

Узагальнені у статті підходи можуть бути використані в практичних цілях, зокрема, при формуванні базових критеріїв фітоіндикації техногенних ЕМП, в оцінці ризиків для агроєкосистем, лісових та заповідних територій поблизу джерел ЕМП; при оптимізації розміщення енергетичних об'єктів та інженерних мереж з урахуванням екологічної безпеки; для прогнозування можливих змін у структурі та продуктивності рослинних угруповань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження реакцій рослин на вплив техногенних електромагнітних полів представлені у низці праць [1, 4, 5, 7, 13–16]. Так, А. Біан (A. Vian) з колегами, вивчаючи вплив високочастотних неіонізуючих електромагнітних полів на рослини, узагальнили, що їх реакції можуть відбуватися на субклітинному рівні або на рівні всієї рослини, проявляючись у формі модифікації росту [15]. Х. Антоніо Ередія-Рохас (J. Antonio Heredia-Rojas) та ін., у своїх дослідженнях показали, що під дією надзвичайно низькочастотних електромагнітних полів у рослин *Nicotiana tabacum* (L.) спостерігаються ознаки оксидативного стресу [7]. М. Флорез (M. Florez) зі співавторами, показали, що низькочастотні ЕМП стимулюють проростання *Phaseolus vulgaris* [3]. А. Павелек (A. Pawelek) та інші, вивчали фізіологічну та біохімічну реакцію *Vicia faba* L. на вплив ЕМП, в залежності від віку насіння, умов освітленості та середовища росту [10]. Біологічний вплив електричних, магнітних та електромагнітних полів (0–100 МГц) на флору та фауну досліджували Б. Попхоф (B. Porhof) з колегами [12]. Ріст, фізіологічні, біохімічні та молекулярні зміни у рослин в умовах зміненого магнітного поля представлені у дослідженнях М. Б. Хафіза (Hafeez M. B.) та ін. [6]. Т. М. Гусман-Арментерос (T. M. Guzmán-Armenteros) з колегами здійснили огляд ролі електромагнітних полів у клітинних взаємодіях та ферментації какао-бобів [5].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри зростаючу кількість досліджень, присвячених впливу техногенних електромагнітних полів на рослини, низка важливих аспектів цієї проблематики залишається недостатньо вивченою або отримані результати є суперечливими. Це обумовлює необхідність системного аналізу сучасної доказової бази та виокремлення ключових наукових прогалин, яким присвячена дана стаття.

Недостатньо з'ясованими залишаються механізми дії ЕМП на рослинні клітини на рівні первинних сигналів і подальших каскадів реакцій. Зокрема, потребують уточнення роль оксидативного стресу, зміни в діяльності мембранних ферментів, регуляція фітогормонального балансу та участь специфічних генів стресових відповідей [16]. Наявні публікації часто обмежуються окремими параметрами, не охоплюючи цілісну систему внутрішньоклітинних процесів.

Відсутнє уніфіковане уявлення про залежність реакцій рослин від параметрів електромагнітних полів – частоти, інтенсивності, тривалості експозиції та типу джерела. Різномірність експериментальних умов у публікаціях ускладнює порівняння даних і не дає можливості сформулювати узагальнені критерії оцінки чутливості рослин.

Малодослідженими залишаються комбіновані та кумулятивні ефекти електромагнітного навантаження в поєднанні з іншими стресорами – посухою, забрудненням важкими металами, підвищеною температурою, зміною освітлення тощо. Недостатньо представлено також довгострокові польові дослідження, які б відображали реальний стан рослин поблизу джерел техногенних ЕМП [10]. Більшість експериментів мають лабораторний характер, що обмежує можливість екстраполяції отриманих результатів на природні екосистеми й агроценози.

Новизна. У статті представлено узагальнений аналітичний огляд сучасних наукових даних щодо реакцій рослин на техногенні ЕМП з акцентом на клітинні, морфологічні, фізіологічні та молекулярні механізми відповіді.

Вперше акцентовано увагу на кумулятивних ефектах електромагнітних полів у поєднанні з іншими стресорами, що має вагоме значення у контексті кліматичних змін та наголошується на потребі проведення дослідження не лише в лабораторних умовах, а й в польових для оцінювання реального екологічного впливу техногенних ЕМП на рослинні угруповання.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Огляд сприяє формуванню комплексного підходу до вивчення впливу електромагнітних полів на рослини і підкреслює необхідність використання взаємодоповнюваних біофізичних, біохімічних та молекулярно-біологічних методів. Це важливо для створення універсальних протоколів оцінки біологічної дії неіонізуючого випромінювання.

Виклад основного матеріалу. Дослідження впливу антропогенних електромагнітних полів (ЕМП) на рослинні організми за останні роки показали багатогранну картину результатів: у різних роботах фіксують стимулюючі, інгібуючі або відсутні ефекти, що значною мірою залежить від частотного діапазону, амплітуди полів, тривалості експозиції, стадії розвитку рослини і особливостей виду. Цю неоднорідність висвітлено в оглядах і наукових звітах останніх років.

Найчастіше виявлені зміни, пов'язані з фотосинтетичною функцією, маркерами окисного стресу, а також модифікаціями ростових параметрів і гормонального профілю. Саме ці показники є найбільш стабільними та відтворюваними біомаркерами при експериментальному аналізі дії ЕМП.

Вивчаючи вплив електромагнітних полів на ріст рослин було з'ясовано, що за дії високочастотних ЕМП він пригнічувався чи припинявся. Так у *Raphanus sativus* спостерігалось пригнічення проростання на

45 % та зменшення подовження гіпокотилія на 40 % при дії мікрохвильового випромінювання низької потужності та поляризованого електромагнітного поля [16]. При опроміненні мобільним телефоном (1800 МГц) насіння *Lens culinaris*, спостерігалось зниження росту коренів розсади (на 60 %) та мітотичного індексу (на 12 %). У *Phaseolus aureus* та *Vigna radiata* після впливу впродовж 4 годин мобільним телефоном сильно постраждало видовження коренів і стебел (на 44 та 39 % відповідно). Пригнічення ростових параметрів коренів та стебел, зменшення маси сирогої та сухої речовини у різних дослідженнях було виявлено у таких видів рослин як *Zea mays*, *Triticum aestivum*, *Cicer arietinum*, *Lemna minor*, *Rosa hybrida*, *Glycine max*. Водночас у *Vigna radiata*, *Ipomoea aquatica* при дії 425 МГц впродовж 2 год, спостерігалась стимуляція росту первинного кореня. У *Trigonella foenum-graecum*, *Pisum sativum* після дії 900 МГц впродовж 0,5–8 год спостерігалось збільшення розміру коренів, а також кількості та розміру бульбочок [16]. Автори зазначають, що вплив високочастотних ЕМП ефективні на різних стадіях розвитку рослин (насіння, розсада або цілі рослини) і можуть впливати на різні органи або процеси розвитку, включаючи проростання насіння та ріст стебла й кореня, що вказує на те, що біологічні зразки навіть малих розмірів здатні сприймати високочастотні ЕМП. Вплив електромагнітних полів на насіння зазвичай призводить до зниження швидкості проростання. Розсада, отримана з насіння, що піддалось впливу електромагнітних полів, демонструвала знижений ріст коренів та/або стебел, але рідко стимулюючий ефект [16].

Б. Попхоф (B. Pophof) з колегами, вивчаючи біологічний вплив електричних, магнітних та електромагнітних полів на флору та фауну, висловили думку, що хоча точний механізм магніторецепції залишається невідомим, кілька доказів свідчать про те, що він може бути опосередкований фітохромом та/або криптохромом [12]. Вплив статичного магнітного поля потужністю 500 мкТ на рослини пригнічував ріст *Arabidopsis thaliana* під дією синього світла, яке збуджує криптохроми, але не під дією червоного світла, яке збуджує фітохроми. Показано, що вплив на рослини потужністю 500 мкТ збільшувало фосфорилування криптохромів (CRY1 та CRY2), залежне від синього світла [12].

І. Цеснене (I. Cesniene) з колегами, вивчали вплив електромагнітних полів на схожість насіння, ріст розсади та її стійкість у *Betula pendula* Roth [1]. Автори зазначають, що магнітні та електричні поля можуть покращити якість насіння багатьох сільськогосподарських культур. Позитивний вплив такої обробки включає кращу схожість насіння та ріст розсади, а також вищу врожайність. Розсада, отримана з обробленого насіння, більш стійка до несприятливих умов навколишнього середовища. Зазначається, що для різних сільськогосподарських культур короткочасна обробка насіння електричним розрядом або

електростатичними чи імпульсними електромагнітними полями призводить до покращення якості насіння (наприклад, схожість у більшості випадків збільшилася до 20 %) [1]. Обробка насіння фізичними стресорами може бути ефективним засобом для підвищення стійкості рослин до різних патогенів, оскільки було виявлено, що ЕМП знижує мікробне зараження насіння. Крім того, обробка насіння ЕМП призвела до збільшення вмісту вторинних метаболітів, включаючи фенольні сполуки, у проростках *Echinacea purpurea*. Окрім того, передпосівна обробка насіння ЕМП, може бути використана для індукування системної стійкості у рослин, що являє собою захисну стратегію, за допомогою якої вони можуть захищені від інфекцій, спричинених патогенами чи шкідниками [1].

А. Павелек (A Pawelek) наводить дані, що обробка рослин чи їх частин різними дозами ЕМП, показала позитивні результати у низки сільськогосподарських культур [10]. Так, насіння *Pisum sativum*, оброблене ЕМП (30 мТл, 85 мТл), демонструвало швидше поглинання води та покращене проростання, а також швидший ранній ріст. У випадку з *Vicia faba* таке ж застосування ЕМП (30 мТл, 85 мТл) позитивно вплинуло на схожість насіння та врожайність під час обробітку в полі, але ефективність цієї обробки залежала від погодних умов. Насіння *Glycine max*, що піддавалося впливу ЕМП (10 Гц, 1,5 мТл), дає рослини з більшою кількістю листя, стручків та насіння, а також покращує довжину стручків та вагу насіння. З іншого боку, не всі дослідження призвели до позитивних результатів агрономічного значення. Так, реакція росту насіння кукурудзи на обробку ЕМП (60 Гц, 20–100 мТл) залежала від сорту, демонструючи позитивний, нейтральний або навіть негативний вплив порівняно з контролем. Обробка насіння *Triticum aestivum* ЕМП (30 мТл) також не мала жодного впливу на врожайність [10].

Електромагнітні поля різної частоти та інтенсивності здатні істотно модифікувати фотосинтетичну активність рослин. До найбільш чутливих показників належать вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів *a* і *b*, каротиноїдів) та ефективність роботи фотосистем, зокрема фотосистеми II. В експериментальних умовах саме ці параметри найчастіше використовують як репліковані індикатори зміни фотосинтезу [16].

Під дією ЕМП у рослин фіксуються як позитивні, так і негативні зрушення пігментного комплексу. Для *Zea mays* описано підвищення вмісту хлорофілу у відповідь на низькочастотну стимуляцію (50 Гц, 0,5 мТл), що свідчить про активацію первинних фотосинтетичних процесів [16]. Натомість радіочастотні поля здатні пригнічувати ефективність фотосистеми II; зокрема, у *Arabidopsis thaliana* встановлено зниження квантового виходу ФС II під впливом радіочастотного випромінювання [16].

Багато досліджень демонструють, що високочастотні та мікрохвильові ЕМП переважно інду-

кують негативні зміни пігментного профілю. Так, було показано, що електромагнітне випромінювання частотою 1 ГГц ($0,47 \text{ Вт кг}^{-1}$) знижувало вміст фотосинтетичних пігментів у 12-денних проростків кукурудзи, причому хлорофіл *a* зменшився на 80 % уже після 7 год експозиції. Аналогічні результати показано за дії мікрохвильового впливу ($10,75 \text{ ГГц}$, 1 мВт см^{-2}), в результаті якого відбулося зниження хлорофілів *a* і *b* у проростків кукурудзи [16].

Одним із універсальних механізмів реакції рослин на дію електромагнітних полів (ЕМП) є розвиток окисного стресу, що супроводжується зміною рівня активних форм кисню (АФК) та активацією систем антиоксидантного захисту. У низці досліджень встановлено, що ЕМП різної частоти та інтенсивності індукують генерацію АФК, зокрема супероксидного аніон-радикалу, перекису водню та гідроксильних радикалів, що зумовлює запуск ферментативних і неферментативних механізмів детоксикації [16].

Підвищення активності супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ), пероксидази (РОД) та ферментів, що беруть участь у метаболізмі глутатіону, поряд зі зростанням вмісту малонового діальдегіду (МДА), розглядають як інформативні біомаркери оксидативного стресу, індукованого ЕМП. Зростання рівня МДА, яке відображає ступінь ушкодження мембран, є типовою відповіддю рослин після експозиції високочастотним електромагнітним полям [16]. Такі зміни супроводжуються активацією каскадів сигнальної трансдукції, що забезпечують формування специфічних адаптивних реакцій.

Більшість робіт узгоджено підтверджують істотне підвищення ферментативної активності антиоксидантних ферментів після дії ЕМП. Активність пероксидази, каталази, супероксиддисмутази та аскорбатпероксидази збільшується у 2–4 рази, що відображає мобілізацію ферментативних механізмів антиоксидантного захисту та перебудову метаболізму клітини [16].

Важливими елементами захисту є також неферментативні антиоксиданти, серед яких аскорбат, глутатіон і каротиноїди відіграють провідну роль у стабілізації клітинних структур та нейтралізації АФК. Магнітні поля здатні підсилювати антиоксидантні властивості рослин, що проявляється у зростанні активності ферментів та зміні рівня вільних радикалів. Неферментативні компоненти системи антиоксидантного захисту також істотно реагують на дію ЕМП, що підтверджено змінами вмісту аскорбату, глутатіону та каротиноїдів [16].

Узагальнення результатів свідчить, що індуція оксидативного стресу є ключовою складовою загальної фізіологічної відповіді рослин на дію електромагнітних полів. Генерація АФК, перебудова антиоксидантної системи, активація кальцієвих та NO-залежних сигнальних шляхів, а також порушення енергетичного обміну формують комплекс адаптивних реакцій, спрямованих на підтри-

мання клітинного гомеостазу. Подальші дослідження молекулярних механізмів та дозо-часових параметрів відповіді дозволять поглибити розуміння стресової фізіології рослин та визначити чутливі біомаркери впливу ЕМП для моніторингу стану рослинних систем.

Ультраструктурні, анатомічні та молекулярні зміни, індуковані електромагнітними полями, свідчать про багаторівневу перебудову клітинних структур та фізіологічних процесів. Електронно-мікроскопічні дослідження демонструють характерні ушкодження мембранних органел: руйнування та деструкцію тилакоїдних мембран, набряк і деформацію хлоропластів, появу осміофільних включень, що є індикаторами деградації мембранних ліпідів [5]. У корневих клітинах фіксують дезорганізацію плазмолем, порушення будови диктіосом і мітохондрій, що відображає порушення енергетичного метаболізму та транспорту речовин на клітинному рівні.

На анатомічному рівні реакції рослин включають потовщення клітинних стінок, зміну розміру та функціональної активності продохів, а також сповільнення формування елементів ксилеми [5]. Ці морфогенетичні зміни інтерпретуються як компенсаторно-адаптивна відповідь, спрямована на підтримання гомеостазу під впливом стресового фактора.

З погляду біофізики, магнітні поля чинять глибокий вплив на клітинні системи, модулюючи плинність і проникність біомембран, активність мембранних білків та інтенсивність молекулярного транспорту [6]. Зміни у властивостях мембран пов'язані з перебудовою ліпідного шару, що може впливати на функціонування фотосинтетичних і дихальних комплексів [6]. Встановлено також, що магнітні поля змінюють активність іонних каналів, які є критично важливими для клітинної комунікації, регуляції потенціалу плазмолем, внутрішньоклітинного розподілу іонів та активації сигнальних каскадів [6].

Важливим напрямом сучасних досліджень є вплив магнітних полів на цитоскелет – систему мікротрубочок та актинових філаментів, що визначає клітинну морфологію, полярність, внутрішньоклітинний транспорт та механічні властивості клітини. Встановлено, що ЕМП здатні змінювати організацію й динаміку цитоскелетних структур, що відображається на процесах міграції клітин, розподілі органел і навіть експресії генів [5]. Ці результати підкреслюють складну багаторівневу взаємодію між магнітними полями та клітинною фізіологією, демонструючи потенційні можливості використання ЕМП у біотехнології, тканинній інженерії та регенеративній медицині [5].

На молекулярному рівні дія електромагнітних полів (ЕМП) охоплює широкий спектр біохімічних та структурних процесів, зокрема пов'язаних зі змінами конформації білків, іонною сигналізацією та функцією сигнальних молекул. Встановлено, що магнітні поля здатні індукувати конформаційні зміни в біл-

кових молекулах через взаємодію з парамагнітними центрами – іонами металів або органічними радикалами [5]. Такі зміни можуть впливати на згортання білків, їх ферментативну активність і метаболічні шляхи, зумовлюючи перебудову електронних спінів та модифікацію просторових структур [5]. Крім того, ЕМП можуть змінювати архітектуру сайтів зв'язування, що впливає на афінність лігандів, інтенсивність сигналіngu та регуляцію експресії генів [5]. Сукупність цих процесів розглядається як потенційний інструмент для застосувань у біотехнології та фармакології, зокрема для модифікації активності ферментів, стабілізації білків у стресових умовах або створення нових сайтів лігандної взаємодії [5].

Важливою ланкою клітинної відповіді на ЕМП є кальцієва сигналізація. Показано, що рання експресія генів, індукована впливом ЕМП, включає щонайменше два кальційзалежні білкові продукти – кальмодулін і кальційзалежну протеїнкіназу [16]. Активність цих сигнальних компонентів тісно пов'язана з енергетичним станом клітини: після дії височастотних ЕМП спостерігається істотне зниження (до 30 %) вмісту АТФ, що свідчить про енергозалежний характер клітинної стрес-реакції [16].

Окремою важливою сигнальною молекулою, задіяною у відповідь на дію ЕМП, є оксид азоту (NO). Його рівень швидко зростає у відповідь на різноманітні абіотичні стимули, включно зі стресом від посухи або механічним ушкодженням [16]. Дослідження [16] показали, що вплив потужного електромагнітного випромінювання на частоті 2,45 ГГц протягом лише 10 секунд призводить до активації NO-синтази та інтенсивного накопичення NO у зернівках пшениці. Це підкреслює ключову роль оксиду азоту як швидкодіючого посередника, що інтегрує зовнішні сигнали у внутрішньоклітинні реакції.

ЕМП може модулювати експресію широкого кола генів у рослин, особливо тих, що пов'язані зі стрес-відповіддю, антиоксидантним захистом, мембранною функцією та гормональною регуляцією.

У дослідженні С. М. Шмідтпота (SM Schmidtrott) та співавторів модельна рослина *Arabidopsis thaliana* була піддана дії ЕМП протягом 48 годин та досліджена на молекулярні зміни за допомогою фотосинтетичної продуктивності, профілювання метаболітів та секвенування РНК [14]. Аналіз транскриптома за допомогою секвенування РНК виявив зміни в кількості транскриптів під час впливу ЕМП. Кількісна полімеразно-ланцюгова реакція у реальному часі підтвердила дерегуляцію деяких вибраних транскриптів [14].

У дослідженнях А. Порчер (A Porcher) зі співавторами було виявлено індукцію експресії аскорбат-пероксидаз (АРХ-1 та АРХ-6) уже через 3 години після впливу електромагнітного імпульсу високої напруги, що вказує на можливу активацію систем антиоксидантного захисту: під впливом ЕМП клітини можуть відповідати підвищенням

транскрипції генів, що пов'язані зі знешкодженням реактивних форм кисню [13].

У роботі з *Lemna minor* показано, що довготривалий вплив низькочастотного магнітного поля призводить до появи нуклеотидних замін у генах, які кодують ферменти антиоксидантного захисту (наприклад, каталази, глутатіон-пероксидази) [9].

Ці результати свідчать, що ЕМП може опосередковано впливати не лише на регуляцію транскрипції, а й на геномну стабільність, потенційно змінюючи послідовності ДНК.

Т. М. Гусман-Арментерос (Т. М. Guzman-Armenteros) та ін. у своїх дослідженнях вказують на те, що магнітні поля можуть модулювати експресію генів та сприяти епігенетичним модифікаціям, впливаючи на клітинну поведінку та довгострокові результати [5]. Електромагнітні поля (ЕМП) можуть впливати на експресію генів, взаємодіючи з внутрішньоклітинними сигнальними шляхами, факторами транскрипції та регуляторними елементами в геномі, впливаючи на такі процеси, як ріст, диференціація, метаболізм тощо. Крім того, магнітні поля пов'язані з епігенетичними модифікаціями, такими як зміни гістонів та метилювання ДНК, які відіграють вирішальну роль у регулюванні моделей експресії генів та підтримці клітинної ідентичності. Ці поля можуть викликати тривалі зміни в профілях експресії генів та впливати на розвиток та диференціацію клітин.

Попри значний обсяг наявних експериментальних даних, дослідження впливу техногенних електромагнітних полів (ЕМП) на рослини досі характеризуються рядом суттєвих методологічних обмежень, що ускладнюють порівняння результатів та формування узагальнених висновків. Так, наразі відсутні стандартизовані параметри експериментів: у сучасних роботах спостерігається значна варіабельність характеристик ЕМП (частот, індукції, щільності потоку, тривалості та режимів експозиції). Це призводить до невідтворюваності результатів, що суттєво знижує достовірність порівняльного аналізу та ускладнює формування загальних закономірностей дії ЕМП на рослинні організми.

Також недостатня кількість досліджень із чітким визначенням питомої швидкості поглинання. Відсутність точних даних щодо енергопоглинання рослинними тканинами не дозволяє встановити коректні дозові залежності й визначити порогові та субпорогові рівні ЕМП, які зумовлюють зміну фізіологічних і молекулярних реакцій.

Серед існуючих досліджень бракує довготривалих та *in situ* досліджень. Наявні результати ґрунтуються переважно на короткотривалих лабораторних експозиціях із контрольованими умовами, що не відображають комплексності природного середовища. Практично відсутні систематичні польові дослідження поблизу об'єктів енергетичної інфраструктури, які б дозволили оцінити кумулятивний і сезонний характер впливу ЕМП на рослинні угруповання,

а також можливі зміни фітоіндикаційних показників у середньо- та довгостроковій перспективі.

З огляду на зазначені обмеження, подальші дослідження мають бути спрямовані на створення уніфікованих методичних протоколів, які враховують частотний діапазон, інтенсивність, тривалість і просторову структуру ЕМП, а також дозволяють здійснювати точну оцінку енергопоглинання рослинними тканинами.

Низкою досліджень показано кумулятивні ефекти електромагнітних полів у поєднанні з іншими абіотичними стресорами, такими як посуха, температурні коливання. Так, Д. Келлер (J. Keller) з колегами показали, що радіочастотне електромагнітне поле порушує позитивну відповідь рослин на засуху [8]. Показано, що в рослин, підданих комбінованому впливу радіочастотного електромагнітного поля і дефіциту води, знижується кількість активних центрів фотосинтетичних комплексів, погіршується квантова ефективність фотосистем, а також порушується енергетичний баланс в системі фотосинтезу [8]. Таким чином, ЕМП може модулювати адаптаційні реакції на посуху, знижуючи здатність рослин активувати ефективні захисні механізми під час водного дефіциту.

Н. Т. Тран (N. T. Tran) з колегами, вивчаючи вплив випромінювання електромагнітних полів на рослини *Lactuca sativa*, показали, що експозиція радіочастотних ЕМП суттєво пригнічує експресію двох генів, пов'язаних із стрес-реакцією: віолаксантиндепоксидази (VDE) та зеаксантиндепоксидази (ZEP) [15]. Це дозволяє припустити, що радіочастотні ЕМП можуть впливати на стресові реакції рослин та знижувати їх стійкість до стресу.

Головні висновки. Отже, техногенні ЕМП викликають різноманітні морфофізіологічні реакції рослин, які можуть варіювати від стимулюючих до інгібуючих залежно від частоти, інтенсивності, тривалості впливу та видоспецифічних особливостей. Накопичення даних свідчить про роль ЕМП у ростових і морфогенетичних процесах рослин, формуванні окисного стресу, модифікації фотосинтетичних параметрів та структури клітин.

Водночас малодослідженими залишаються комбіновані та кумулятивні ефекти електромагнітного навантаження у поєднанні з іншими абіотичними стресорами. Недостатня кількість довгострокових польових досліджень поблизу джерел техногенних ЕМП, а також переважання короткотривалих лабораторних експериментів суттєво обмежують можливість екстраполяції отриманих результатів на природні екосистеми й агроценози.

Перспективи використання результатів дослідження. Узагальнені у статті дані можуть слугувати науковою основою для створення та вдосконалення методів біоіндикації електромагнітного забруднення, уточнення екологічних нормативів і критеріїв безпечного рівня техногенного ЕМП, а також

для оптимізації агротехнологічних підходів у регіонах із підвищеним електромагнітним навантаженням. Отримані результати є цінним підґрунтям для

подальших фундаментальних досліджень у галузі радіоботаніки, стрес-фізіології рослин та екологічної токсикології.

Література

1. Cesniene I, Miskelyte D, Novickij V, Mildaziene V, Sirgedaite-Seziene V. Seed Treatment with Electromagnetic Field Induces Different Effects on Emergence, Growth and Profiles of Biochemical Compounds in Seven Half-Sib Families of Silver Birch. *Plants*. 2023. 12 (17). p. 3048. <https://doi.org/10.3390/plants12173048>
2. Danho S, Escobar Huertas JF, Schoellhorn WI. A Systematic Review of the Impact of Electromagnetic Waves on Living Beings. *Cureus*. 2025 17(8): e90355. DOI 10.7759/cureus.90355
3. Florez M., Carbonell MV, Martinez E., Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany*, 2007. 59 (1). p.68-75 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.10.006>
4. Glibovyt'ska, N., Rashev'ska, H., Arkhypova, L., Adamenko, Ya., & Orfanova, M. Impact of electric power facilities on natural phytocenotic diversity. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2024. 15 (2). p. 8-22. doi: 10.31548/forest/2.2024.08
5. Guzmán-Armenteros TM, Ruales J, Ramos-Guerrero L. A Review of Electromagnetic Fields in Cellular Interactions and Cacao Bean Fermentation. *Foods*. 2024. 13 (19). p. 3058. <https://doi.org/10.3390/foods13193058>
6. Hafeez M. B., Zahra N., Ahmad N., Shi Z., Raza A., Wang X., Li J. Growth, physiological, biochemical and molecular changes in plants induced by magnetic fields: A review. *Plant Biology*. 2022. 25 (1). p. 8-23 <https://doi.org/10.1111/plb.13459>
7. Heredia-Rojas Antonio J., Freeze-Gallardo Erick, Quistian-Martínez Deyanira, Rodríguez-De la Fuente Abraham O., Gomez-Flores Ricardo, F. David, Lafuente-Rincón, Heredia-Rodríguez Omar, Valadez-Lira Alberto. Low-frequency electromagnetic fields increase oxidative stress in tobacco plants. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2023. 35 (2). p. 139-144 doi: 10.9755/ejfa.2023.v35.i2.2994 <http://www.ejfa.me/>
8. Keller J, Geier U, Tran NT. In-Depth Analysis of Chlorophyll Fluorescence Rise Kinetics Reveals Interference Effects of a Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) on Plant Hormetic Responses to Drought Stress. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. 26 (15). p. 7038. <https://doi.org/10.3390/ijms26157038>
9. Kouzmanova, M., Angelova, B., Atanasova, G., Atanasov, B., Atanasov, N., Goltsev, V. & Paunov, M. Electromagnetic fields in precision agriculture: do they provoke oxidative stress in maize plants? *Bulg. J. Agric. Sci.* 2024. 30 (1). p. 118–124.
10. Pawelek A, Wyszowska J, Cecchetti D, Dinka MD, Przybylski K, Szmidt-Jaworska A. The Physiological and Biochemical Response of Field Bean (*Vicia faba* L. (partim)) to Electromagnetic Field Exposure Is Influenced by Seed Age, Light Conditions, and Growth Media. *Agronomy*. 2022. 12 (9). p.2161. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092161>
11. Perovych, L., Perovych, I. and Lazariya, O. Accuracy of Determining Ecologically Safe Territories in the Zones of Electromagnetic Fields Caused by Radio-Television Antennas and Cellular Communications. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2022. 5 (1). p. 40–46. Doi: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.050103>
12. Pophof B, Henschenmacher B, Kattinig DR, Kuhne J, Vian A, Ziegelberger G. Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora. *Workshop Report. Health Phys.* 2023. 124 (1). p. 39–52. doi: 10.1097/HP.0000000000001624
13. Porcher A, Wilmot N, Bonnet P, Procaccio V, Vian A. Changes in Gene Expression After Exposing *Arabidopsis thaliana* Plants to Nanosecond High Amplitude Electromagnetic Field Pulses. *Bioelectromagnetics*. 2024. 45(1). p. 4-15. doi: 10.1002/bem.22475. Epub 2023 Jul 6. PMID: 37408527
14. Schmidtpott SM, Danho S, Kumar V, Seidel T, Schöllhorn W, Dietz K-J. Scrutinizing the Impact of Alternating Electromagnetic Fields on Molecular Features of the Model Plant *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. 19(9). p.5144. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095144>
15. Tran NT, Jokic L, Keller J, Geier JU, Kaldenhoff R. Impacts of Radio-Frequency Electromagnetic Field (RF-EMF) on Lettuce (*Lactuca sativa*)-Evidence for RF-EMF Interference with Plant Stress Responses. *Plants (Basel)*. 2023. 28. 12(5). p. 1082. doi: 10.3390/plants12051082
16. Vian A, Davies E, Gendraud M, Bonnet P. Plant Responses to High Frequency Electromagnetic Fields. *Biomed Res Int*. 2016. p.1830262. doi: 10.1155/2016/1830262

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025