нафтопродуктів.

Список літератури

1. Дзендзель А. Ю., Пида С. В. Рекультивант композиційний Trevitan™ – новий комплексний препарат для швидкої регенерації ґрунту. *Освітні та наукові виміри природничих наук : зб. матеріалів II Всеукр. заоч. наук. конф. (м. Суми, 8 грудня 2021 р.).* Суми : СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2021. С. 51–53.
2. Кочмар І. М., Левинська Х. В. Оцінка екологічного стану ґрунтів урбоекосистеми міста Городок Львівської області. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.* 2024. № 30. С. 17–25. DOI: 10.32447/20784643.30.2024.02.
3. Накемпій О. К. Використання біотехнологій у зниженні техногенного забруднення ґрунтів. *Проблеми охорони праці в Україні.* 2025. Вип. 41, № 3–4. С. 92–96.
4. Leliushok S., Naumovska O., Moldovan L. Unauthorised landfills as a source of soil contamination with heavy metals: phytotoxic aspect. *Bioscience*. 2025. Vol. 16, No. 3. P. 42–61.
5. Mokrani S., Houali K., Yadav K. K., Arabi A. I. A., Eltayeb L. B., Alreshidi M. A., Benguerua Y., Cabral-Pinto M. M. S., Nabti E.-H. Bioremediation techniques for soil organic pollution: mechanisms, microorganisms, and technologies A comprehensive review. *Ecological Engineering*. 2024. Vol. 207. Art. 107338.

**УДК 577.21:581.1:551.58**

## БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РОСЛИН ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

**Старанчук В. С., Федорчак Д. А., Мохнацький О. С., Грицак Л. Р.**

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

E-mail: lerastaranchuk@gmail.com

Сучасні кліматичні зміни є одним із ключових викликів для сільського господарства, оскільки супроводжуються підвищенням середньорічних температур, зміною режимів опадів і збільшенням

частоти екстремальних погодних явищ. Це призводить до посилення дії абіотичних стресових факторів, зокрема водного дефіциту, високих температур та осмотичного стресу, які суттєво знижують життєздатність і продуктивність рослин. В умовах нестабільного зволоження та зростаючого температурного навантаження особливого значення набуває пошук ефективних підходів до підтримання водного балансу, стабільності фотосинтетичного апарату та функціонування антиоксидантної системи рослин. За даними Всесвітньої метеорологічної організації, 2024 рік став найтеплішим за весь період інструментальних спостережень, що підтверджує тенденцію до глобального потепління [4]. Аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що підвищення температури та дефіцит вологи негативно впливають на врожайність основних сільськогосподарських культур, зокрема пшениці, кукурудзи та рису, зумовлюючи необхідність впровадження інноваційних адаптаційних стратегій [3, 5].

У зв'язку з цим біотехнологічні підходи набувають особливої актуальності як інструмент підвищення стійкості рослин до несприятливих умов довкілля. До таких підходів належать використання регуляторів росту, мікробних інокулянтів, мікоризних асоціацій, а також методи клітинної селекції та генетичної інженерії. Важливою перевагою біотехнологічних методів є їх здатність забезпечувати комплексний вплив на фізіологічні та біохімічні процеси рослин, сприяючи формуванню адаптивних реакцій на рівні клітини, тканини та організму в цілому.

Метою дослідження є узагальнення сучасних біотехнологічних підходів до підвищення стійкості рослин до кліматичних змін і визначення найбільш перспективних напрямів їх практичного застосування. Як модельний об'єкт обрано пшеницю м'яку озиму (*Triticum aestivum* L.) сорту Подолянка, яка є однією з провідних продовольчих культур і водночас чутливою до абіотичних стресів. Для оцінювання потенціалу біологічної підтримки рослин розглянуто використання ризосферних бактерій *Bacillus subtilis*, арбускулярно-мікоризного гриба *Rhizophagus irregularis*, а також їх комбінованого застосування. Аналіз

ефективності проводився за оцінкою схожості насіння, морфометричних параметрів рослин, а також динаміки вмісту фотосинтетичних пігментів, малонового діальдегіду, показників водного режиму за росту в умовах водного дефіциту, температурного та осмотичного стресу.

Згідно з літературними даними, ризосферні бактерії, зокрема *Bacillus subtilis*, здатні стимулювати ріст рослин шляхом синтезу фітогормонів, мобілізації поживних речовин і індукції системної стійкості [1]. Вони також сприяють зниженню рівня оксидативного стресу шляхом активації антиоксидантних ферментів. Арбускулярно-мікоризні гриби, такі як *Rhizophagus irregularis*, формують симбіотичні асоціації з кореневою системою рослин, що забезпечує покращене поглинання води та фосфору, стабілізацію фотосинтетичних процесів і підвищення толерантності до посухи та засолення [2]. Комбіноване використання бактеріальних і мікоризних агентів розглядається як перспективний підхід до формування комплексної стійкості рослин до абіотичних стресів.

Результати дослідження показали, що за умов водного дефіциту найбільш ефективним є комбіноване застосування *Bacillus subtilis* і *Rhizophagus irregularis*. У цьому варіанті довжина кореня зберігалася на рівні 89,4 % від контролю, а довжина пагона – 86,7 %. Сумарний вміст хлорофілів становив 1,70 мг/г порівняно з 1,15 мг/г у стрес-контролі, що свідчить про підтримання фотосинтетичної активності. Водночас рівень малонового діальдегіду, який є маркером пероксидного окиснення ліпідів і пошкодження клітинних мембран, знижувався до 9,2 нмоль/г проти 15,9 нмоль/г у контрольному варіанті, що відповідає зменшенню ступеня мембранного пошкодження на 42,1 %.

За умов температурного стресу комбінована обробка також продемонструвала високу ефективність: схожість насіння становила 87 %, довжина кореня – 70 мм, довжина пагона – 89 мм, а вміст хлорофілів – 1,45 мг/г. Інтегральний індекс стійкості досягав 0,85, що значно перевищує показники стрес-контролю. Порівняно з ним довжина кореня збільшувалася на 40,0 %, довжина пагона – на 43,5 %, тоді як рівень малонового діальдегіду зменшувався на 40,6 %, що свідчить про ефективний захист

клітинних структур від термічного пошкодження.

За осмотичного стресу, змодельованого додаванням NaCl, комбінований варіант забезпечував схожість 86 %, відносний вміст води – 76 %, сумарний вміст хлорофілів – 1,48 мг/г та індекс стійкості – 0,84. Отримані результати підтверджують, що поєднання бактеріальних і мікоризних агентів забезпечує більш виражений позитивний ефект порівняно з їх окремим застосуванням, що зумовлено синергією їх дії на різні ланки фізіологічних процесів рослин.

Таким чином, у роботі обґрунтовано, що комплексне використання мікробним препаратів на основі *Bacillus subtilis* і *Rhizophagus irregularis* є ефективним біотехнологічним підходом до підвищення адаптивного потенціалу рослин в умовах кліматично зумовлених абіотичних стресів. Застосування таких біологічних агентів сприяє стабілізації водного режиму, підтриманню фотосинтетичної активності та зниженню рівня оксидативного стресу, що в цілому забезпечує підвищення стійкості рослин. Такий підхід може бути корисним для передпосівної біологічної обробки насіння, удосконалення системи кліматично орієнтованого рослинництва та подальших експериментальних перевірок у лабораторних, тепличних і польових умовах.

Список літератури

1. Backer R., Rokem J. S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Article 1473. DOI: 10.3389/fpls.2018.01473.
2. Begum N., Qin C., Ahanger M. A., Raza S., Khan M. I., Ashraf M., Ahmed N., Zhang L. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. Article 1068. DOI: 10.3389/fpls.2019.01068.
3. Lobell D. B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science.* 2011. Vol. 333, No. 6042. P. 616–620. DOI: 10.1126/science.1204531.

4. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2024. Geneva : WMO, 2025.
5. Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D. B., Huang Y., Asseng S. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2017. Vol. 114, No. 35. P. 9326–9331. DOI: 10.1073/pnas.1701762114.

**УДК 581.143.6:582.683.2:581.522.4**

## ОСОБЛИВОСТІ ВВЕДЕННЯ В КУЛЬТУРУ *IN VITRO* РІДКІСНОГО ВИСОКОГІРНОГО КАРПАТСЬКОГО ВИДУ *PRIMULA MINIMA* L.

**Гончарська М. С., Метельська І. С., Грицак Л. Р., Колісник Х. М.**

Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка
E-mail: hrytsak1972@gmail.com

Вивчення реліктових рослинних видів, які є важливою складовою генофонду природної флори західного регіону, має значну наукову та практичну цінність. Через погіршення екологічного стану довкілля та зростання антропогенного навантаження на природні фітоценози посилюється ризик зникнення окремих популяцій і зменшення чисельності багатьох видів, насамперед реліктових і тих, що знаходяться на межі свого ареалу. Такі процеси негативно впливають на стабільність і функціонування природних екосистем. Серед рідкісних декоративних рослин особливу увагу привертає *Primula minima* L. – первоцвіт дрібний. Це високогірний альпійський вид, поширений у Центральній і Південній Європі, переважно в межах альпійського та субальпійського поясів. Рослина існує в екстремальних кліматичних умовах, що сприяло формуванню у неї специфічних адаптивних механізмів. Завдяки цим особливостям *P. minima* вважають важливим індикатором стану високогірних екосистем, оскільки зміни у чисельності та життєздатності його популяцій можуть відображати трансформації навколишнього середовища під впливом