

## РОЛЬ МІКРООРГАНІЗМІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ РЕСУРСІВ ТА ЗМІНИ КЛІМАТУ – ОГЛЯД

**ТИЩЕНКО А.В.** – доктор сільськогосподарських наук, старший дослідник  
[orcid.org/0000-0003-1918-6223](https://orcid.org/0000-0003-1918-6223)

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства  
Національної академії аграрних наук України

**ТИЩЕНКО О.Д.** – кандидат сільськогосподарських наук, с.н.с.  
[orcid.org/0000-0002-8095-9195](https://orcid.org/0000-0002-8095-9195)

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства  
Національної академії аграрних наук України

**ПІЛЯРСЬКА О.О.** – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник  
[orcid.org/0000-0001-8649-0618](https://orcid.org/0000-0001-8649-0618)

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства  
Національної академії аграрних наук України

**ОЧКАЛА О.С.** – PhD (Doctor of Philosophy)  
[orcid.org/0000-0002-1609-5679](https://orcid.org/0000-0002-1609-5679)

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства  
Національної академії аграрних наук України

**Вступ.** Існує постійна проблема, щодо забезпечення продовольчої безпеки населення планети, яке швидко зростає, одночасно зі збереженням природних ресурсів. Однією з причин падіння виробництва рослинництва є несприятливі умови навколишнього середовища, коли сільськогосподарські культури піддаються численним абіотичним стресам, таким як екстремальна температура, посуха, солоність ґрунту, нестача води та поживних речовин, забрудненість навколишнього середовища важкими металами, що суттєво впливає на врожайність сільськогосподарських культур [23]. Високу врожайність можна отримати за допомоги мінеральних добрив. Але, регулярне, надмірне та незбалансоване використання мінеральних добрив є великою небезпекою для екологічного середовища, а виробництво мінеральних добрив є енергоємним процесом та потребує великої кількості енергетичних ресурсів. Тому, використання корисних мікроорганізмів, розглядаються як економічно привабливий та екологічно безпечний шлях для зменшення витрат, збільшення забезпеченості рослин поживними речовинами, покращення родючості ґрунтів, якості продукції та отримання максимальної врожайності сільськогосподарських культур [73]. Ризобактерії, що стимулюють ріст рослин (PGPR) сприяють посиленому росту рослин, пригнічують патогенну активність та відновлюють здоров'я ґрунту через мінералізацію органічних забруднювачів. PGPR забезпечують рослини основними поживними речовинами (азот, фосфор) за допомогою різних процесів, що відбуваються між рослиною та мікроорганізмами: біологічна фіксація азоту, солюбілізація фосфату, виробництво сидерофора, синтез фітогормонів та контроль фітопатогенних мікроорганізмів [68]. Арбускулярні мікоризні гриби (AMF) також відіграють безпосередню значну роль у покращенні росту та розвитку рослин, поглинають фосфор та інші мінеральні поживні речовини з ґрунту та задовольняють потреби рослин у них. Крім того, вони зменшують наслідки забруднених ґрунтів, сприяють захисту рослин

від патогенів та покращенню родючості та структури ґрунтів [21].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ризобактерії (PGPR).** Ґрунтові бактерії дуже важливі в біогеохімічних циклах і давно використовуються при вирощуванні сільськогосподарських культур. Взаємодія рослин і бактерій у ризосфері відбувається через безліч процесів, але головними є ті, що визначають ріст і розвиток рослин та родючість ґрунту. Вільноживучі ґрунтові бактерії, які зазвичай називають ризобактеріями, що сприяють росту рослин (PGPR), є найбільш перспективними [14, 36]. Вони зустрічаються в ряді типів бактерій (*Actinobacteria*, *Proteobacteria* та *Firmicutes*), включаючи штами, що належать до родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Alcaligenes*, *Arthobacter*, *Agrobacterium*, *Burkholderia*, *Comamonas*, *Pantoea*, *Rhizobium*, *Serratia* та *Variovorax* [43]. PGPR проявляють свій благотворний вплив по-різному, або стимулюють природні процеси для посилення та підвищення поглинання поживних речовин та їх засвоєння і синтезують певні сполуки для рослин, чи запобігають та захищають рослини від хвороб і сприяють підвищенню їх стійкості до абіотичного стресу [86]. Функції та механізми дії PGPR різноманітні та не всі бактерії їх проявляють однаково [22]. Ці процеси варіюють залежно від змін вмісту гормонів, виробництва летких сполук, збільшення доступності поживних речовин або підвищення стійкості до абіотичного стресу [15].

Механізми підвищення стійкості рослин до абіо- та біотичних стресів, після інокуляції деякими PGPR, надзвичайно широкі та приносять позитивні зміни для рослини за допомогою таких процесів, як синтез фітогормонів, фіксація азоту, солюбілізація фосфатів і біоконтроль захворювань. Ці процеси сприяють прискореному зростанню пагонів та коренів, зміни його морфології, збільшенню доступності поживних речовин та їх покращенню засвоєння і підвищенню стійкості до біо- і абіотичних стресів. Тим більше якщо, враховувати зміну клімату

і обмежені ресурси, то здатність PGPR покращувати розвиток рослин за стресових умов, таких як посуха та засолення, є дуже важливою та найголовніше, з меншою кількістю хімікатів можна отримати більш високий врожай [34]. Майже всі абіотичні стреси сприяють утворенню надлишкових активних форм кисню (АФК) у рослинах, які є високоактивними та токсичними і приводять до пошкодження білків, ліпідів, вуглеводів та ДНК, що зрештою рослина отримує окисний стрес [29], який можна зменшити, шляхом обмеження виробництва АФК або його усунути [61]. Проте рослини забезпечені ефективними антиоксидантними системами широкого спектру, які допомагають уникнути згубного негативного впливу окисного стресу, але не завжди вони здатні протистояти йому, а PGPR покращують та посилюють роботу системи антиоксидантного захисту рослин [83]. Іншим важливим ефектом інокуляції PGPR рослини в умовах абіотичного стресу є покращення водного статусу листя, особливо в умовах посухи та сольового стресу, коли збільшується біомаса коренів, площа листя, вміст хлорофілу, фотосинтез [2, 54]. Щоб підтримувати постійний водний баланс в умовах стресу, рослинам необхідно збалансувати втрату води листям і воду, яка надходить у рослину, що видобувається її кореневою системою. В умовах стресу, баланс води вищий в інокульованих рослинах, тому ці рослини мають кращі показники ефективності використання води, що визначається відношенням між приростом сухої ваги та спожитою водою [78]. У листі баланс води, в основному регулюється продиховим отвором та продиховою провідністю. При посушливому стресі, наприклад, використання *Azospirillum* сприяє синтезу абсцизової кислоти, що викликає закриття продихів, накопиченню розчинених речовин для пом'якшення зневоднення. Крім того, цей симбіоз покращує й інші властивості рослин, в тому числі поліпшує архітектуру кореневої системи шляхом збільшення розгалуження коренів та щільності кореневих волосків, що у свою чергу, допомагає рослинам переносити дефіцит води [26].

Бобові культури мають унікальну біологічну властивість, яка полягає у встановленні симбіотичних відносин з азотфіксуючими бактеріями (NFB) роду *Rhizobium*, результатом є біологічна фіксація азоту (BNF). В процесі симбіозу бобових і ризобій, бобові можуть щорічно фіксувати приблизно від 100 до 300 кг/га атмосферного азоту ( $N_2$ ) [40]. Завдяки біологічній азотфіксації ризобії забезпечують рослини азотом. Але не зважаючи на те, що на частку азоту ( $N_2$ ) в атмосфері припадає приблизно 78% загальних газів атмосфери, проте ця форма недоступна для рослин. І, тільки завдяки важливому процесу біологічної азотфіксації у присутності ферменту нітрогенази, інертний атмосферний азот повітря перетворюється на аміак ( $NH_3$ ), доступну форму азоту для рослин [3]. Мутуалістичні відносини з ризобіями утворюють 70% бобових і вони здатні фіксувати азот з атмосфери, зменшуючи їхню потребу в додатковому азоті [34]. Це єдиний шлях забезпечення рослин азотом, який не порушує екологію навколишнього середовища.

Азот є найбільш необхідною поживною речовиною для більшості культивованих рослин, і він

безпосередньо впливає на ріст, розвиток рослин та врожайність, а отже, дефіцит азоту, є основним обмежувачим фактором у рослинництві [31, 94]. Він має важливе значення в житті рослин, оскільки, бере участь у синтезі та виробництві фітогормонів, коферментів, нуклеїнових кислот, вторинних метаболітів, вмісту хлорофілу та білків [96]. Шляхом фіксації азоту симбіотичними системами бобових культур і бульбочкових бактерій та асоціативними і вільноіснуючими мікробами до орного шару ґрунту, надходить приблизно стільки біологічного азоту, скільки його вносять із мінеральними азотними добривами. Тому, пошук шляхів мобілізації внутрішніх резервів азотфіксаторів для максимальної інтенсифікації процесу біологічної фіксації, це головне завдання [84, 95]. Слід врахувати, що на ефективність симбіозу між рослиною та *Rhizobium* суттєво впливають фактори навколишнього середовища, такі як кислотність ґрунту, солоність, температура, вологість, інтенсивність освітлення та доступність поживних речовин. Ці фактори впливають на ключові процеси, включаючи виживання ризобій, утворення бульбочок і активність нітрогенази, що в кінцевому підсумку визначає ріст і продуктивність бобових [91]. Крім того, ця взаємодія в генетичному плані дуже складна з огляду на генетичні відмінності рослини-господаря і рас *Sinorhizobium melloti* та оптимальний ефект може бути отриманий тільки, від адитивної взаємодії генів. Інколи вона неадитивна через несумісність генотипів рослин і штамів бульбочкових бактерій. Тому симбіоз може давати як позитивний, так і негативний ефект [98]. Варто зазначити, що за продуктивністю симбіотичної азотфіксації розрізняються не тільки різні види бобових, але і сорти одного виду. Вони неоднакові як за ступенем утворення бульбочок, так і за кінцевою продуктивністю цього процесу. Тому необхідно підібрати сорт-штам для ефективного процесу симбіозу та використання найкращих комбінацій корисних мікробів для різних сільськогосподарських культур [40, 97]. Ризобактерії окрім фіксації азоту виконують ще деякі корисні функції: виробляють фітогормони, сидерофори, здійснюють біоконтроль фітопатогенів. За допомогою процесу солюбілізації фосфату, PGPR розчиняють фосфор та інші мінеральні поживні речовини, цим підвищують їх доступність для рослин. У процесі солюбілізації можливість отримання доступного фосфору складає 30-50 кг/га за рік, а також відбувається мобілізація деяких необхідних мікроелементів: Zn, Fe, Mo [49].

Фосфор є другим незамінним елементом для рослин, і є важливим елементом для різноманітних метаболічних і фізіологічних процесів, що охоплюють енергетичний обмін, синтез ДНК [37]. Він є компонентом складної структури нуклеїнових кислот, цукрів і ліпідів. Крім того, фосфор бере важливу участь у процесах розвитку рослин, як на клітинному рівні, так і на рівні цілої рослини, а саме: розвитку кореня, пагонів, квіток та насіння, фотосинтезі, диханні та фіксації азоту [47]. Це найменш рухливий елемент порівняно з іншими макроелементами. Хоча загальний фосфор у ґрунті міститься у формі органічних і неорганічних сполук, проте більшість з них залишаються неактивними і тому недоступними для рослин. Приблизно від 70 до 90% фосфорних

добрих, внесених у ґрунт, осаджується катіонами металів Ca, Fe та Al, утворюючи нерозчинні форми, які рослини не можуть засвоювати. Тому, мікроорганізми (PSM), особливо фосфатсолубізуючі бактерії (PSB), що солубілізують фосфат, відіграють дуже важливу роль у живленні рослин фосфором [5].

Калій (K) є третім найважливішим елементом живлення для рослин, що відіграє важливу роль у фізіологічних і метаболічних процесах рослин [85]. Загальні запаси калію в ґрунті, як правило, значні, хоча розподіл форм та кількість його у різних ґрунтах неоднаковий та відрізняється він також від присутніх у ньому домінуючих мінералів [64]. Крім того, інтенсивне внесення хімічних добрив, коли рослини не повністю використовують його, а надлишок мінеральних речовин втрачається через дощову воду або надмірне зрошення, інтенсивне вирощування культур, рН, вапнування, замерзання та відтавання, змочування та висихання тощо. Але, головним є хімічні реакції, які відбуваються в ґрунті та сприяють перебуванню калію в доступній або фіксованій формі. Тому використання мікробних солубілізаторів калію є ефективним методом підвищення доступності калію рослинам, що, у свою чергу, покращує їх продуктивність [33, 65]. Існує широкий спектр мікроорганізмів які вивільняють калій з мінералів і постачають рослинам у доступній формі в ґрунті. До них належать такі бактерії, як *Acidotherobacillus ferrooxidans*, *Aminobacter* spp., *Arthrobacter* sp., *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus cereus*, *Bacillus circulans*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus edaphicus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus mucilaginosus*, *Bacillus subtilis*, *Burkholderia* spp., *Cladosporium*, *Enterobacter hormaechei*, *Flectobacillus* spp., *Paenibacillus* spp. та *Pseudomonas* spp. [57]. Використання ефективних місцевих штамів, що солубілізують калій, можуть слугувати альтернативою синтетичним калієвим добривам, цим зменшити забруднення ґрунту. Крім того, можна використовувати бактерії, що розчиняють калій (KSB) для рекультивації деградованих земель [70].

Бактерії також здатні виробляти сидерофори, це органічні сполуки з низькою молекулярною масою, які продукуються мікроорганізмами в умовах низького вмісту заліза. Основною функцією цих сполук є хелатування тривалентного заліза ( $Fe_3$ ) з різних наземних і водних середовищ існування і таким чином зробити його доступним для мікробних і рослинних клітин. Залізо має важливе значення для всіх організмів. Воно бере участь у фотосинтезі, в кількох метаболічних процесах, синтезу амінокислот, перенесенні кисню, фіксації азоту та дихання [82]. Ризобактерії, що продукують сидерофори, окрім покращення стану рослин і живлення залізом, вони ще пригнічують ріст інших мікроорганізмів зокрема, перешкоджають росту патогенів, шляхом обмеження доступу патогену до заліза [32]. Це важливий механізм біологічного контролю, що здійснюють мікроорганізми, оскільки вони конкурують з шкідливими патогенами рослин за ресурси заліза та перешкоджають їм отримати доступ до них [41]. PGPR також сприяє поліпшенню біоремедіації забруднених ґрунтів за рахунок посиленого поглинання важких металів і деградації ксенобіотичних

сполук, таких як пестициди [7] тому їх використовують як альтернативне джерело для мінімізації зростаючого використання синтетичних добрив і пестицидів [68].

**Мікориза.** Мікоризні гриби зустрічаються в більшості ґрунтів і колонізують коріння багатьох видів рослин та утворюють симбіоз з рослинами і безпосередньо беруть участь у мінеральному живленні рослин [4, 58]. З кількох мікоризних симбіонтів найпоширенішою є арбускулярна мікориза [8]. Арбускулярні мікоризні гриби (AMF) – це група важливих симбіотичних мікроорганізмів, що зустрічаються в екосистемах та є найпоширенішими співіснуючими грибами в ґрунті. Вони можуть співіснувати з більш ніж 70-90% видами рослин для встановлення симбіотичних стосунків та є облигатними симбіонтами [59]. Це є стійкий симбіоз між рослинами та грибами. У такому співіснуванні, мікоризний гриб сприяє більшому поглинанню поживних речовин рослинами-господарями (фосфор, вода та мінерали) [17] й таке партнерство сприяє глобальному поглинанню вуглецю та стабілізацію ґрунту [59]. Крім того, AMF в симбіозі з рослинами-господарями підвищують стійкість рослин до хвороб, посилюють біологічну фіксацію азоту, підвищують стійкість рослин до посухи, збільшують швидкість фотосинтезу, знижують концентрацію таких елементів, як кадмій і миш'як у тканинах рослин та покращують фізичні властивості ґрунту [87]. Взаємін гриби отримують сполуки фотосинтезу рослини-господаря, тому він залежить від нього [75]. До 20% фотосимбіотів у рослинах-господарях надходять до мікоризних кореневих систем для підтримки мутуалістичної взаємодії. У симбіозі, рослини-господарі забезпечують гриби AM джерелом органічного вуглецю, який спрямовується до колонізованих коренів і контролюється як рослиною, так і грибом [8]. Вважається, що двонаправлений обмін поживними речовинами під час симбіозу AM відбувається за моделлю «вільного ринку», у якій і рослини, і гриби можуть контролювати свої запаси, щоб підтримувати стабільні симбіотичні стосунки. Але, рослини-господарі здатні розрізняти і обирати найкращих партнерів для симбіозу та постачати їм більшу кількість вуглеводів. Натомість гриби AM передають більше мінеральних поживних речовин до тих коренів, що забезпечує їх більшою кількістю вуглеводів [42].

Життєвий цикл AMF починається з проростання спор грибів у ґрунті за сприятливих умов, спонтанно, без присутності рослини-господаря [67], але рослини виділяють кореневий ексудат стріголактон (SL) для стимулювання проростання спор, на який вони реагують збільшенням розгалуженості гіф і підвищенням метаболічної активності [11]. Це важливий етап у життєвому циклі AMF, заснований на хемотаксичних здібностях AMF. Грибні гіфи реагують на хімічні сигнали, отримані від господаря, та переорієнтують свій ріст у бік коренів і цим рослини регулюють симбіотичні взаємодії з арбускулярними мікоризними грибами, які дозволяють рости гіфам до коренів рослини-господаря та формувати апресорії [71]. Фаза симбіозу починається, саме із з'єднання гіф грибів із корінням рослини через апресорії, і проникнення грибів у кору рослини [25]. Грибні гіфи поширюються в ґрунт від мікоризних коренів

і покращують ефективність поглинання мало рухомих поживних речовин, таких як P, Zn і Cu, а також мінеральних форм N і K. Покращене поглинання поживних речовин мікоризними рослинами порівняно з немікоризними рослинами відбувається завдяки гіфам грибів, які ростуть за межами зони виснаження кореневих поживних речовин і в мікропорах ґрунту, збільшуючи поглинаючу поверхню та доступ до неорганічних і органічних форм P і N [56]. Вони на кореневій системі утворюють дві унікальні спеціалізовані структури – сильно розгалужену структуру, яка заснована всередині клітин кореня, яка називається арбускули, це основне місце, де проходить симбіотичний обмін поживними речовинами та структурою, яка називається везикули, де зберігаються поживні речовини у клітинах кореня рослини господаря [12, 60]. Арбускули є місцем активного двонаправленого переносу поживних речовин між рослиною та грибом [12], який є фізіологічною основою мутуалізму. Рослини постачають цукри грибам, а вони підвищують здатність рослин поглинати дефіцитні, нерухомі та мало рухомі речовини, зокрема фосфор [74]. Колонізовані мікоризою корені, мають два шляхи поглинання поживних речовин: безпосередньо через кореневий епідерміс і кореневі волоски (прямий шлях) і опосередковано через перенесення грибкових гіф AM із зовнішніх мікоризних гіф у клітини кори кореня, де арбускули забезпечують симбіотичні інтерфейси (мікоризний шлях). Різні комбінації грибів AM і рослин функціонально різноманітні, як за ефективністю грибів як симбіонтів, так і за чутливістю рослин щодо загального поглинання фосфору та росту порівняно з контролем [12, 74]. Тому, арбускули відіграють важливу роль у мікоризному симбіозі. Серед різних мікроорганізмів, що колонізують ризосферу, арбускулярні мікоризні гриби (AMF) унікальні, тому що вони частково знаходяться всередині кореня, а частково поза коренем, утворюють зовнішній міцелій, таким чином впливають на інші мікроорганізми в ґрунті, а також на зростання рослин [66]. Симбіотична асоціація корневих грибів збільшує поглинання менш рухливих поживних речовин [58], в основному фосфору (P), але також і таких мікроелементів, як цинк (Zn) та мідь (Cu), а також впливає на поглинання води. AMF також здатні стимулювати виробництво речовин, що регулюють зростання, збільшують фотосинтез, покращують осмотичне регулювання в умовах посухи, засолення та підвищують стійкість до шкідників та хвороб, що передаються через ґрунт [28]. Ці переваги в основному пояснюються покращеним фосфорним живленням [62]. AMF сприяють поглинанню поживних речовин із води та ґрунту та доставляються рослинам-господарям. Основні механізми мікоризного розкладання органічної речовини ґрунту включають ферментативну деградацію, неферментативні механізми, такі як реакція Фентона, за допомогою якої відбувається руйнування багатьох органічних речовин, що сприяє оптимальному співвідношенню N і C. Крім того, такі симбіотичні відносини між корінням рослин і грибами здатні вивільняти фосфатази та органічні кислоти для підвищення розчинності фосфору (P) у ґрунті та зростання міцелію, завдяки цьому рослини отримують більше P. Однак

ріст грибного співтовариства регулюється численними факторами навколишнього середовища, включаючи розподіл господарів, умови ґрунту та кліматичні зміни [80]. Як зазначають Marschner H. et al., зовнішні гіфи AMF можуть доставляти рослинам різну кількість елементів: P (80%), Cu (60%), N (25%), Zn (25%) і K (10%) через збільшення площі поглинаючої поверхні та мобілізацію обмежено доступних джерел поживних речовин [48]. Дійсно гриби AM шляхом збільшення площі поглинаючої поверхні посилюють мобілізацію доступного фосфору та полегшують його поглинання. Мікоризні рослини мають більший вміст фосфору, ніж немікоризні, контрольні. Наприклад, у рисі, колонізованому AM, близько 70% загального отриманого P доставляється симбіотичними грибами [90].

AMF зазвичай визнають симбіонтами широкої дії, які виявляють здатність взаємодіяти з різними видами рослин, але деякі комбінації рослин і грибів можуть працювати краще, ніж інші. Тому, вибір партнера не є однозначним, через те, що він керується отриманням винагороди від симбіонту [42]. Грибковий міцелій AMF впливає на рослину, тим що він розширює кореневу систему, що дозволяє рослинам покращити використання води та мінеральних речовин із ґрунту [88]. Рослини, які колонізовані AMF, мають кращу стійкість до екологічних стресів, таких як посуха, холод, забруднення [38]. Різні фактори під час посухи, можуть зашкодити життю рослин. Одним із таких факторів є недостатня доступність води для коренів, що може призвести до зниження рівня транспірації та підвищеного рівня окисного стресу у рослині. Вплив посухи зменшує біомасу, водний потенціал листя та продихову провідність, шкодить росту рослин через активність ферментів, поглинання іонів і поглинання поживних речовин [10]. Тому, симбіотичні відносини між AMF і рослиною можуть призвести до ряду позитивних ефектів. Вони можуть оптимізувати фотосинтез, підвищити осмотичне регулювання, завдяки чому рослини краще корегують кількість води в клітинах, збільшують накопичення проліну, що допомагає захистити рослини від різних стресових факторів навколишнього середовища і підвищити рівень глутатіону, що потрібен рослинам, як сильний антиоксидант [45]. AMF стимулюють різні фізіологічні процеси в рослинах, забезпечують їх поживними речовинами, вологою та захистом від хвороб, що сприяє їм краще протистояти умовам посухи. Крім того, коренева система рослин, які AMF колонізує, часто більша та розгалуженіша, що сприяє кращому поглинанню води та важкодоступних поживних речовин [93].

Гриби AMF покращують структуру ґрунту завдяки його міцелію, який присутній у ґрунтах у величезних кількостях [19] та що важливе, міцелій має властивість створювати стійкі ґрунтові агрегати, завдяки утворенню глікопротеїну (гломаліну) [72]. Основна функція гломаліну полягає в тому, щоб стабілізувати агрегації ґрунту та діяти як клей, який зв'язує між собою мікроагрегати ґрунту (діаметр <250 мкм) для формування стабільних макроагрегатів [44, 52]. Такі макроагрегати ґрунту забезпечують кращу інфільтрацію води, зменшують поверхневий стік, контролюють ерозію ґрунту,



зменшують втрати поживних та органічних речовин, збільшують газообмін, краще утримують воду та мінерали, особливо калій, і в результаті, покращують продуктивність сільськогосподарських культур [20].

**Спільна дія грибів та бактерій.** Арбускулярні мікоризні гриби та ризобії є двома важливими симбіонтами рослин. *Rhizobia* відомі тим, що фіксують азот у бульбочках коренів бобових, тоді як гриби *Arbuscular mycorrhizal* (AM) забезпечують рослини поживними речовинами та іншими перевагами. Тому, взаємодія між AMF, бактеріями та рослинами має значний потенціал для посилення росту рослин та все більше визнається як вирішальний внесок у підвищення врожайності та стресостійкості культур. Їх спільне застосування показало значний ефект на різні культури, який полягає у збільшенні поглинання поживних речовин, підвищенні ефективності використання води та стійкості до біотичних і абіотичних стресів [30]. Слід зазначити, що окремо гриби та азотфіксуючі бактерії відіграють життєво важливу роль у забезпеченні рослин основними поживними речовинами в ґрунті, а їхня спільна інокуляція має значний синергетичний ефект. Були встановлені позитивні результати асоціацій між бульбочковими ризобіальними бактеріями та AMF, які підтвердили цінні ефекти взаємодії AMF-Rhizobia в бобових рослинах, наприклад, у вігні, автори відзначали синергетичний ефект за висотою рослини, за сухою масою пагонів та кореня, кількістю бульбочок, врожайністю рослин, колонізації коренів та поглинанням поживних речовин із значним підвищенням вмістом фосфору, азоту в рослинах [51]. У акації сенегальської завдяки комбінованій інокуляції арбускулярних мікоризних грибів (AMF) і ризобій підвищилась висота рослини, швидкість колонізації коренів арбускулярною мікоризою, кількість бульбочок, але не спостерігалось збільшення вмісту поживних речовин у пагонах [55]. Крім того, арбускулярні мікоризні гриби також діють разом з PGPR корисними мікробами в ґрунті та ризосфері. Ці взаємодії можуть позитивно впливати на ріст рослин за допомогою симбіотичної фіксації азоту, солюбілізації поживних речовин, якщо фосфатсолюбілізуючі бактерії, то вони розчиняють сполуки фосфору для легкого поглинання AMF та перенесення рослині-господарю. Ці взаємодії покращують доступність і засвоєння поживних речовин [24]. У стресових умовах посухи спільна інокуляція з PGPR та AMF здатна протистояти пошкодженню рослин *Cupressus arizonica* від нестачі води та сприяє підвищенню її водостійкості, шляхом накопичення антиоксидантних ферментів для протистояння стресу [1], а також захищає бульбочки бобових рослин від передчасного їх старіння [69], це можна пояснити підвищеною активністю антиоксидантного ферменту глутатіонредуктази та проліну, які накопичуються в корінні рослин нуту при мікоризації їх грибами AM [63]. На думку A. Nanjundappa et al. комбінована інокуляція допомагає захистити рослини від патогенів рослин та абіотичних стресів, таких як посуха, засолення, токсичність важких металів тощо. AMF та *Bacillus* spp. в ґрунті виявляють синергізм при сумісному застосуванні і стимулюють зростання рослин набагато більшою мірою, ніж при інокуляції окремо будь-яким з них. У польових умовах, при цьому, можна вносити

50% рекомендованої норми NPK добрив без негативного впливу на зростання та врожайність культур [53]. Що стосується хвороб, то особлива роль належить взаємодії між AMF *Glomus mosseae* (Gm) та *Rhizobium leguminosarum* і наприклад, збудником кореневої гнилі *Fusarium solani* на звичайній квасолі (*Phaseolus vulgaris*), тут спостерігається пригнічення корневих патогенів грибом Gm, саме, в присутності *R. leguminosarum*, але наскільки це дієво буде залежати від навколишнього середовища, рослини-господаря та присутності симбіонту. При пошкодженні кореневої системи, патогени зменшують її масу, але колонізація коренів грибом, змушує здорову частину коренів, працювати більш ефективно та частково компенсувати роботу пошкодженої кореневої системи [18]. Бувають інші механізми біоконтролю. Так, на думку Gao et al. захист рослини від патогенної інфекції ризобіями та AMF можна пояснити існуванням конкуренції між ними за місця колонізації коренів рослин [27], а також активізацією загальної захисної системи рослини, яка полягає в тому, що ризобії і AMF виробляють токсичні метаболіти, які перешкоджають росту та розвитку патогенів [16] або збільшують вміст фенольних кислот у корневих ексудатах при інокуляції ризобіями та AMF, що підвищує резистентність рослин до патогенів [27, 76].

Під час сольового стресу, інокуляція рослин *A. gerrardii* при спільному використанні AMF та *B. subtilis*, посилила ріст рослин і засвоєння поживних речовин, а також покращила симбіотичну продуктивність. Крім того, *B. subtilis* посприяла збільшенню колонізації коренів рослин та зниженню концентрації Na і Cl у рослинах, тим самим захистила їх від змін, спричинених іонним і осмотичним сольовим стресом [35]. Синергетичний ефект між мікроорганізмами (AMF і *Rhizobium*) відмічено на зростанні врожаю арахісу, а розвиток рослин відбувався без використання хімічних добрив [39]. Взаємодія між бактеріями та грибами в результаті подвійної інокуляції конюшини білої, спостерігали у неї зростання рослин, а також посилення бульбочкоутворюючого процесу, що сприяло підвищенню азотфіксуючої здатності [46], а також спостерігалось посилене пагоноутворення та збільшення вмісту азоту в листі та корені, загального вмісту розчинного протеїну в корені, активності нітрогенази та вмісту амінокислот [89]. Але, отримані ефекти, що збільшуються від інокуляції, можуть бути різними залежно від поєднання видів грибів і бактерій, що спільно застосовуються, наприклад, за вмістом азоту, фосфору, цинку, заліза та міді в рослинах нуту [81]. На підтвердження цього Stancheva I. et al. повідомляють, що подвійна інокуляція гороху *G. mosseae* + *Rh. leguminosarum* тільки у цьому поєднанні, збільшувала кількість бульбочок, рівень активності фіксації азоту, але в іншому комбінуванні гриба, але з тією ж ризобактерією (*G. intraradices* + *Rh. leguminosarum*) ці показники були нижчими [77], і тільки спільна інокуляція зі спеціальним AMF і ризобіями може покращити фіксацію азоту та зростання рослин [13], так симбіотична ефективність сої залежала від комбінації поєднання певних штамів *Rhizobium* і видів *Glomus* [69]. Високий рівень симбіотичної азотфіксації можливий за рахунок підвищення ефективності

використання фосфору, особливо в умовах дефіциту фосфору [79]. Максимальний ефект у сої, отримано лише за певного поєднання штамів бактерій та видів грибів: значно збільшилась кількість бульбочок та підвищився зміст азоту в пагонах і коренях сої на 13,72 і 18,47% відповідно [50]. Дійсно, Azcon R. ін. було встановлено, що ефективність симбіозу залежить від конкретної комбінації штамів *Rhizobium* та видів *Glomus*, це вказує на те, що має існувати певна селективна сумісність між мікосимбіонтами бобових [6]. У люцерни *Medicago ruthenica* наприклад, різний консорціум грибів та бактерій, неоднаково впливав на надземну масу та архітектуру кореня. Інокуляція AMF і *Rhizobium* показали збільшення площі кореневої поверхні, але зменшила середній діаметр і об'єм коренів. Взаємодія між *Bacillus* і AMF змінила негативне співвідношення між питомою довжиною кореня та діаметром кореня. Багатосторонні симбіози з AMF, *Bacillus* та *Rhizobium* мали суттєвий негативний вплив на довжину кореня [92]. Симбіотичні взаємодії між AMF та генномодифікованим штамом GM *Rhizobium* у люцерни, сприяли змінам у морфології коренів, збільшенню ступеня розгалуження та кількості бічних коренів, відсоток мікоризованих рослин [9].

Привертає увагу той факт, що, сприятливий вплив має спільна інокуляція сої AMF+ ризобіум у посівах, за проміжного вирощування соя-кукурудза, коли кукурудза забезпечується азотом фіксованим бобовими та передається він з допомогою гіф гриба і азот ефективно використовуватися кукурудзою з мінімальною витратою азотних мінеральних добрив [50].

**Висновки.** Таким чином, аналіз літературних джерел допоміг встановити, що ризобактерії (PGPR) стимулюють та покращують ріст рослин, за допомогою різних процесів: біологічної фіксації азоту, солюбілізації фосфату, виробництва сидерофорів, синтезу фітогормонів і цим можуть забезпечувати захист рослин шляхом обмеження росту патогенів та посилюють синтез антибіотиків для придушення інфекції.

AMF в симбіозі з рослинами-господарями також покращують ріст та розвиток рослин, поглинають фосфор та інші мінеральні поживні речовини з ґрунту та задовольняють їх потреби. Вони можуть оптимізувати фотосинтез, підвищити осмотичне регулювання, завдяки чому рослини краще корегують кількість води в клітинах, збільшують накопичення проліну, що допомагає захистити рослини від різних стресових факторів навколишнього середовища і підвищити рівень глутатіону, що потрібен рослинам, як сильний антиоксидант та краще їм сприяє протистояти умовам посухи.

Правильний підбір ризобактерій, AMF та рослин-господаря, при їх спільному застосуванні, може забезпечити високий синергічний ефект за різними ознаками та властивостями (рівень симбіотичної азотфіксації, активізація загальної захисної системи рослини, архітектура кореня, продуктивність).

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Biochemical response and interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria during establishment and stimulating

- growth of Arizona cypress (*Cupressus arizonica* G.) under drought stress / Aalipour H., Nikbakht A., Etemadi N., Rejali F., Soleimani M. *Sci Hortic.* 2020. 261:108923. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.10892>
2. Efficacy of *Rhizobium* and *Pseudomonas* strains to improve physiology, ionic balance and quality of mung bean under salt-affected conditions on farmer's field / Ahmad M., Zahir Z.A., Khlid M., Nazls F., Arshad M. *Plant Physiol Biochem.* 2013. Vol. 63. P. 170-176. doi: 10.1016/j.plaphy.2012.11.024.
3. Ali M.A., Naveed M., Mustafa A., Abbas A. The Good, the Bad, and the Ugly of Rhizosphere Microbiome. In: Probiotics and Plant Health. Kumar V., Kumar M., Sharma S., Prasad R. (eds). Springer, Singapore. 2017. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2_11).
4. Al-Karaki G. N. Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulture.* 2006. Vol. 109, Issue 1. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.019>
5. Anand K., Kumari B., Mallick M.A. Phosphate solubilizing microbes: An effective and alternative approach as bio-fertilizers. *J. Pharm. Sci.* 2016. Vol 8, Issue 2. P. 37-40.
6. Azcon R., Rubio R., Barea J. M. Selective interactions between different species of mycorrhizal fungi and *Rhizobium meliloti* strains, and their effects on growth, N<sub>2</sub> fixation (<sup>15</sup>N) and nutrition of *Medicago sativa* L. *New Phytologist.* 1991. Vol. 117, P. 399-404. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.tb00003.x>
7. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture / Backer R., Rokem J.S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D.L. *Front. Plant Sci.* 2018. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
8. Bago B., Philip E. Pfeffer, Yair Shachar-Hill. Carbon Metabolism and Transport in Arbuscular Mycorrhizas. *Plant Physiol.* 2000. Vol. 124, Issue 3. P. 949-58. doi: 10.1104/pp.124.3.949
9. Barea J. M., Tobar R. M., Azcon-Aguilar C. Effect of a genetically modified *Rhizobium meliloti* inoculant on the development of arbuscular mycorrhizas, root morphology, nutrient uptake and biomass accumulation in *Medicago sativa*. *New Phytol.* 1996. Vol. 134, Issue 2. P. 361-369. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb04641.x>
10. Benaffari W., Boutasknit A., Anli M. et al. The native arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost-based organic amendments enhance soil fertility, growth performance, and the drought stress tolerance of quinoa. *Plants.* 2022. Vol. 11. P. 393. <https://doi.org/10.3390/plants11030393>
11. Strigolactones stimulate arbuscular mycorrhizal fungi by activating mitochondria / Besserer A., Puech-Page's V., Kiefer P., Gomez-Roldan V., Jauneau A., et al. *PLoS.* 2006. Vol. 4, Issue 7:e226. DOI: 10.1371/journal.pbio.0040226.
12. Bonfante P., Genre A. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat Commun.* 2010. Vol. 1. P. 48. <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>
13. Bio-boosting agriculture: Harnessing the potential of fungi-bacteria-plant synergies for crop improvement. *Discov* / Brar B., Bala K., Saharan B.S.,

- Sadh P.K., Duhan J.S. *Plants*. 2024. Vol. 1, P. 21. <https://doi.org/10.1007/s44372-024-00023-0>
14. Calvo P., Nelson L., Kloepper J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil*. 2014. Vol. 383. P. 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
  15. Choudhary D.K., Sharma K.P., Gaur R.K. Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems. *Biotechnol Lett*. 2011. Vol. 33. P. 1905–1910. <https://doi.org/10.1007/s10529-011-0662-0>.
  16. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects / Compant S., Brion D., Jerzy N., Christophe C., Essaid A. B. *Appl Environ Microbiol*. 2005. Vol. 71. P. 4951–4959.
  17. Dalpé Y., Monreal M. Arbuscular mycorrhiza inoculum to support sustainable cropping systems. *Online. Crop Management*. 2004. doi:10.1094/CM-2004-0301-09-RV
  18. Dar G. H., Zargar M. Y., Beigh G. M. Biocontrol of Fusarium root-rot in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by using symbiotic *Glomus mosseae* and *Rhizobium leguminosarum*. *Microb Ecol*. 1997. Vol. 34. P. 74–80. <http://dx.doi.org/10.1007/s002489900036>
  19. Interconnectedness, length and viability of arbuscular mycorrhizal mycelium as affected by selected herbicides and fungicides / de Novais C.B., Avio L., Giovannetti M., de Faria S.M., Siqueira J.O. et al. *Appl. Soil Ecol*. 2019. Vol. 143. P. 144–152. doi: 10.1016/j.apsoil.2019.06.013
  20. Linkages between root traits, soil fungi and aggregate stability in tropical plant communities along a successional vegetation gradient / Demenois J., Rey F., Ibanez T., Stokes A., Carriconde F. *Plant Soil*. 2018. 424. 319–334. doi: 10.1007/s11104-017-3529-x
  21. Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture / Demir S., Danesh Y. R., Durak E. D., Najafi S., Boyno G. *Plant and Soil Microbiome*. 2024. P. 71–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19150-3.00017-5>.
  22. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria / Dey R., Pal K. K., Bhatt D. M., Chauhan S. M. *Microbiol. Res*. 2004. Vol. 159. Issue 4, 15. P. 371–394. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.004>.
  23. Dhaliwal S. S., Sharma V., Shukla A. K. Impact of micronutrients in mitigation of abiotic stresses in soils and plants – A progressive step toward crop security and nutritional quality. *Advances in Agronomy*. 2022. Vol. 173. P. 1–78. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.001>
  24. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: importance in biotic and abiotic stressed regulation / Diagne N., Ngom M., Djighaly P.I., Fall D., Hoher V., et al. *Diversity*. 2020. Vol. 12, Issue 10, P. 370. <https://doi.org/10.3390/d12100370>
  25. Dighton J. Mycorrhizae Encyclopedia of Microbiology (Third Edition). 2009. P. 153–162. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00327-8>.
  26. Fukami J., Cerezini P., Hungria M. Azospirillum: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Expr*. 2018. Vol. 8. P. 73. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>.
  27. Co-Inoculation with Rhizobia and AMF Inhibited Soybean Red Crown Rot: From Field Study to Plant Defense-Related Gene Expression Analysis. Defense-Related Gene Expression / Analysis Gao X., Lu X., Wu M., Zhang H., Pan R. et. al. *PLoS One*. 2012. Vol. 7. Issue 3:e33977. doi: 10.1371/journal.pone.0033977
  28. Ghazi N. Al-Karaki. Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulture*. 2006. Vol. 109, Issue 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.019>
  29. Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem*. 2010. Vol. 48, Issue 12. P. 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
  30. Gomathy M., Sabarinathan K. G., Priya J., Ananthi K., Dilip S. Synergistic Interactions of PGPR and AM Fungi in Enhancing Crop Productivity – A Winning Microbial Combination. *Int J. Environ Sci Nat Res*. 2024. Vol. 33, Issue 3:556365. DOI: 10.19080/IJESNR.2024.33.556365
  31. Good A. Toward nitrogen-fixing plants. *Science*. 2018. Vol. 359, Issue 6378. P. 869–870. DOI: 10.1126/science.aas8737
  32. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review / Goswami D., Thakker J. T., Pinakin C., Dhandhukia P. C., Moral M. T. *Cogent Food & Agriculture*. 2016. Vol. 2, Issue 1. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500>
  33. Han H. S., Supanjan, Lee K. D. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant Soil and Environment*. 2006. Vol. 52. P. 130–136.
  34. Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review / Hasan A., Tabassum B., Hashim M., Khan N. *Bacteria*. 2024. Vol. 3, Issue 2. P. 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>
  35. The Interaction between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Endophytic Bacteria Enhances Plant Growth of *Acacia gerrardii* under Salt Stress / Hashem A., Abd Allah E.F., Alqarawi A.A., Al-Huqail A.A., Wirth S. et al. *Front. Microbiol*. 2016. Vol. 7:1089. doi: 10.3389/fmicb.2016.01089
  36. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review / Hayat R., Ali S., Amara U., Khalid R., Ahmed I. *Ann Microbiol*. 2010. Vol. 60. P. 579–598. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1>.
  37. Isidra-Arellano M.C., Delaux P.M., Valds-Lpez O. The Phosphate Starvation Response System: Its Role in the Regulation of Plant-Microbe Interactions. *Plant Cell Physiol*. 2021. Vol. 62. P. 392–400. doi: 10.1093/pcp/pcab016.
  38. Juniper S., Abbott L. K. Soil salinity delays germination and limits growth of hyphae from propagules of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*. 2006. Vol. 16, No. 5. P. 371–379. DOI: 10.1007/s00572-006-0046-9.
  39. Kaur S., Singla P., Muskaan S. Interactive Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizobium on Growth and Nutrient Content of *Arachis Hypogaea*. *International Journal of Sustainable Agricultural Research*. 2020. Vol. 7, Issue 4. P. 211–227. DOI: 10.18488/journal.70.2020.74.211.227
  40. Kebede E. Contribution, Utilization, and Improvement of Legumes-Driven Biological Nitrogen Fixation in Agricultural Systems. *Front. Sustain. Food Syst. Sec*.



- Agroecology and Ecosystem Services*. 2021. Vol. 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998>.
41. Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions / Khoshru B., Mitra D., Khoshmanzar E., Myo E.M., Uniyal N. et al. *J. Plant Nutr.* 2020. Vol. 43. P. 3062–3092. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1799004>
  42. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis / Kiers E.T., Duhamel M., Beesetty Y., Mensah J.A., Franken O., et al. *SCIENCE*. 2011. Vol. 333, Issue 6044. P. 880–882. DOI: 10.1126/science.1208473
  43. Kloepper J. W., Lifshitz R., Zablotowich R. K. Free living bacterial inocula for enhancing crop productivity. *Trends Biotechnol.* 1989. Vol. 7, Issue 2. P. 39–44. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(89\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0167-7799(89)90057-7).
  44. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity / Lehmann J., Hansel C.M., Kaiser C., Kleber M., Maher K., et al. *Nat. Geosci.* 2020. Vol. 13. P. 529–534. doi: 10.1038/s41561-020-0612-3
  45. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in C3 (*Leymus chinensis*) and C4 (*Hemarthria altissima*) grasses via altering antioxidant enzyme activities and photosynthesis / Li J., Meng B., Chai H., Yang X., Song W., et al. *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10, P. 499. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00499>
  46. Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia synergistically promote root colonization, plant growth, and nitrogen acquisition / Liu X.Q., Xie M.M., Hashem A., et al. *Plant Growth Regul.* 2023. Vol. 100, P. 691–701. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00966-60>
  47. Malhotra H., Sharma S., Pandey R. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. In book: *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. 2018. Doi: 10.1007/978-981-10-9044-8 7.
  48. Marschner H., Dell B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant Soil*. 1994. Vol. 159. P. 89–102. <https://doi.org/10.1007/BF00000098>
  49. Mathew K., Joseph M. K., Topno S. Effect of biofertilizer and photosynthetic bacteria on growth, yield and quality of Strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. winter dawn. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. Vol. 7, Special Issue 7. P. 541–544 DOI: <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i7Sh.1127>
  50. Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen uptake and transfer in soybean/maize intercropping system / Meng L., Zhang A., Wang F., Han X., Wang D., et al. *Front. Plant Sci., Sec. Plant Nutrition*. 2015. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00339>
  51. Mirdhe R. M., Lakshman H. C. Synergistic interaction between Arbuscular mycorrhizal fungi, Rhizobium and phosphate solubilising bacteria on *Vigna unguiculata* (L) Verdc. *Int. J. Bioassays*. 2014. Vol. 3, Issue 5. P. 2096–2099.
  52. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi / Morris E. K., Morris D. J. P., Vogt S., Gleber S.-C., Bigalke M., et al. *ISME J.* 2019. Vol. 13. P. 1639–1646. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0369-0>
  53. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants / Nanjundappa A., Bagyaraj D. J., Saxena A. K., Kumar M., Chakdar H. *Fungal Biol Biotechnol.* 2019. Vol. 6, Issue 23. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0086-5>
  54. Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by *Burkholderia phytofirmans* PsJN and *Enterobacter* sp. FD17 / Naveed M., Mitter B., Reichenauer T. G., Wieczorek K., Sessitsch A. *Environmental and Experimental Botany*. 2014. Vol. 97. P. 30–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.014>.
  55. Effects of dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on *Acacia senegal* (L.) Willd. seedling growth and soil enzyme activities in senegal / Ndoye F., Kane A., Diedhiou A.D., Bakhoun N., Fall D., Sadio O., et al. *Int. J. Biosci.* 2015. Vol. 6, No. 2. P. 36–48. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/6.2.36-48>
  56. Newsham K. K., Fitter A. H., Watkinson A. R. Multi-functionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. *Trends Ecol. Evol.* 1995. Vol. 10, Issue 10. P. 407–411. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89157-0](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89157-0)
  57. The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics / Olaniyan F.T., Alori E.T., Adekiya A.O., Ayorinde B.B., Daramola F.Y., et al. *Ann Microbiol.* 2022. Vol. 72, Issue 45. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01701-8>
  58. Ortas I., Kaya Z., Çakmak I. Influence of arbuscular mycorrhizae inoculation on growth of maize and green pepper plants in phosphorus- and zinc-deficient soil. In: Horst, W.J., et al. *Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences*. 2001. Vol 92. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/0-306-47624-X\\_306](https://doi.org/10.1007/0-306-47624-X_306)
  59. Parniske M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nat Rev Microbiol.* 2008. Vol. 6. P. 763–775. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>
  60. Pepe A., Giovannetti M., Sbrana C. Different levels of hyphal self-incompatibility modulate interconnectedness of mycorrhizal networks in three arbuscular mycorrhizal fungi within the Glomeraceae. *Mycorrhiza*. 2016. Vol. 26. P. 325–332. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0671-2>
  61. Pintó-Marijuan M., Munné-Bosch S. Photo-oxidative stress markers as a measure of abiotic stress-induced leaf senescence: advantages and limitations. *Exp Bot.* 2014. Vol. 65, Issue 14. P. 3845–57. doi: 10.1093/jxb/eru086.
  62. Plenchette C. C., Meynard J. M., Fortin J. A. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Can J Plant Sci.* 2005. Vol. 85, Issue 1. P. 31–40. <https://doi.org/10.4141/P03-159>
  63. Porcel R., Ruíz-Lozano J. M. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *J. Exp Bot.* 2004. Vol. 55. P. 1743–1750.
  64. Prajapati K., Modi H. A. The Importance of Potassium in Plant Growth—A Review. *Indian Journal of Plant Sciences*. 2012. 2-3. P. 177–178.
  65. Praveen S. Chemistry of potassium availability in soil. *International Journal of Chemical Studies*. 2019. 7(1):1916–1918.
  66. Requena N., Breuninger M. The Old Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in the Light of the Molecular Era. In: Esser, K., Lüttge, U., Beyschlag, W., Murata, J. (eds) *Progress in Botany. Progress in Botany*. 2004. Vol 65. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18819-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18819-0_13)



67. Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhizal establishment / Requena N., Serrano E., Ocón A., Breuninger M. *Phytochemistry*. 2007. Vol. 68, No. 1. P. 33–40. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.09.036.
68. Riaz U., Murtaza G., Anum W. et al. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizers and Biopesticides. In: Hakeem, K.R., Dar, G.H., Mehmood, M.A., Bhat, R.A. (eds) *Microbiota and Biofertilizers*. Springer, Cham. 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3_11).
69. Arbuscular mycorrhizal symbiosis can alleviate drought induced nodule senescence in soybean plants / Ruiz-Lozano J. M., Collados C., Barea J. M., Azcón R. *New Phytologist*. 2001. Vol. 151. P. 493–502. <http://dx.doi.org/10.1046/j.0028-646x.2001.00196.x>
70. Polyphasic Characterization of Indigenous Potassium-Solubilizing Bacteria and Its Efficacy Studies on Maize / Saheewala H., Sanadhya S., Upadhyay S.K., Mohanty S.R., Jain D. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, Issue 7. P. 1919; <https://doi.org/10.3390/agronomy13071919>
71. Sbrana C., Giovannetti M. Chemotropism in the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycorrhiza*. 2005. Vol. 15. P. 539–545. <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0362-5>
72. The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems / Singh A. K., Zhu X., Chen C., Wu J., Yang B. et al. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2020. P. 1–35. doi: 10.1080/10643389.2020.1862561
73. Effects of biofertilizer on the production of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) in greenhouse / Sini H. N., Barzegar R., Mashae S. S., Ghahsare M. G., Mousavi-Fard S. et al. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024. Vol. 16:101060. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101060>.
74. Smith S. E., Smith F. A., Jakobsen I. Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiol.* 2003. Vol. 13. P. 16–20. <https://doi.org/10.1104/pp.103.024380>.
75. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition / Smith S.E., Jakobsen I., Grønlund M., Smith F. A. *Plant Physiology*. 2011. Vol. 156, Issue 3. P. 1050–1057. <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>
76. Role of arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen fixing bacteria on legume growth under various environmental stresses. Abdoulaye Soumare / Soumare A., Diop T., Manga A., Ndoye I. *International Journal of Biosciences (IJB)*. 2015. Vol. 7, No. 4. P. 31–46. DOI:10.12692/ijb/7.4.31-46
77. Effects of combined inoculation of Pea plants with arbuscular mycorrhizal fungi and Rhizobium on nodule formation and nitrogen fixing activity / Stancheva I., Geneva M., Zehirov G., Tsvetkova G., Hristozkova M. et al. *Gen. Appl. Plant physiology*. 2006. special issue. P. 61–66.
78. Seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria enhances yield of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.) / Stefan M., Munteanu N., Stoleru V., Mihasan M., Hritcu L. *Sci. Hortic.* 2013. Vol. 151. P. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.006>.
79. Tajini F., Trabelsi M., Drevon J. J. Combined inoculation with *Glomus intraradices* and *Rhizobium tropici* CIAT899 increases phosphorus use efficiency for symbiotic nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Saudi J Biol Sci.* 2011. Vol. 19, Issue 2. P. 157–163. doi: 10.1016/j.sjbs.2011.11.003
80. Kashif Tanwir, Saghir Abbas, Muhammad Shahid, Hassan Javed Chaudhary, Muhammad Tariq Javed. Mycorrhizal Symbiosis and Nutrients Uptake in Plants. *Plant Ionomics: Sensing, Signaling, and Regulation*. 2023. <https://doi.org/10.1002/9781119803041.ch5>
81. Interactive effects of Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobial strains on chickpea growth and nutrient content in plant / Tavasolee A., Aliasgharzad N., SalehiJouzani G., Mardi M., Asgharzadeh A. *African Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 10, Issue 39. P. 7585–7591. DOI: 10.5897/AJB10.2412
82. Genetic diversity of siderophore-producing bacteria of tobacco rhizosphere / Tian F., Ding Y., Zhu H., Yao L., Du B. *Brazil. J. Microbiol.* 2009. Vol. 40. P. 276–284. doi: 10.1590/S1517-838220090002000013
83. Uarrota V.G. et al. Plant-Rhizobacteria Communications with the Antioxidant System. In: Singh, H.B., Vaishnav, A., Sayyed, R. (eds) *Antioxidants in Plant-Microbe Interaction*. Springer, Singapore. 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0_3)
84. Uribe D., Sánchez-Nieves J., Vanegas J. Role of Microbial Biofertilizers in the Development of a Sustainable Agriculture in the Tropics. In: Dion, P. (eds) *Soil Biology and Agriculture in the Tropics*. Soil Biology. 2010. Vol 21. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-05076-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-05076-3_11).
85. Verma A., Patidar Y., Vaishampayan A. Isolation and purification of potassium solubilizing bacteria from different regions of India and its effect on crop's yield. *Indian J. Microbiol. Res.* 2016. Vol. 3, Issue 4. P. 483–488. DOI: 10.18231/2394-5478.2016.0029
86. Beneficial Soil Microbiomes and Their Potential Role in Plant Growth and Soil Fertility / Vincze E.B., Becze A., Becze A., Laslo E., Mara G. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, Issue 1. P. 152. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010152>.
87. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, and Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic and Biotic Stresses / Wahab A., Muhammad M., Munir A., Abdi G., Zaman W. et al. *Plants*. 2023. Vol. 12, Issue 17:3102. doi: 10.3390/plants12173102
88. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant abiotic stress / Wang Q., Liu M., Wang Z., Li J., Liu K. et al. *Sec. Microbial Symbioses*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1323881>
89. Single or dual inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia regulates plant growth and nitrogen acquisition in white clover / Xie M.-M., Zou Y.-N., Wu Q.-S., Zhang Z.-Z., Kuča K. *Plant Soil Environ.* 2020. Vol. 66. P. 287–294. <https://doi.org/10.17221/234/2020-PSE>
90. Salamin Nonredundant regulation of rice arbuscular mycorrhizal symbiosis by two members of the phosphate transporter gene family / Yang S. Y., Grønlund M., Jakobsen I., Grottemeyer M. S., Rentsch D. et al. *Plant Cell*. 2012. Vol. 24, Issue 10. P. 4236–4251. doi: 10.1105/tpc.112.104901
91. Role of Environmental Factors in Legume-Rhizobium Symbiosis: A Review / Yeremko L., Czopek K.,

- Taniak M., Marenych M., Hanhur V. *Biomolecules*. 2025. Vol. 15, Issue 1. P. 118. doi: 10.3390/biom15010118.
92. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Alter the Interaction Effects Between *Bacillus* and *Rhizobium* on Root Morphological Traits of *Medicago ruthenica* L. / Yu L., Zhang H., Zhang W., Han B., Zhou H. et al. *J. Soil Sci Plant Nutr.* 2023. Vol. 23. P. 2868–2877. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01242-2>
  93. Water-land-food nexus for sustainable agricultural development in main grain-producing areas of North China / Zhu L., Bai Y., Zhang L., Si W., Wang A. et al. *Foods*. 2023. Vol. 12, Issue 4. P. 712. <https://doi.org/10.3390/foods12040712>
  94. Господаренко Г. М. Агрохімія. Умань, 2024. 572 с.
  95. Коць С. Я. Біологічна фіксація азоту: досягнення та перспективи розвитку. Фізіологія рослин і генетика. 2021. Т. 53, №2. С. 128-159. <https://doi.org/10.15407/frg2021.02.128>
  96. Ніколайчук В. І., Белчгазі В. Й. Фізіологія і біохімія рослин. Ужгород: Вид-во Ужгород, нац. ун-ту, 2005. 192 с.
  97. Науково-методичні засади селекції та насінництва люцерни в умовах зрощення / Тищенко О.Д., Вожегова Р.А., Тищенко А.В., Андрусів Л.В., Боровик В.О. Херсон: ФОП Грін Д.С., 2017. 236 с.
  98. Вплив різних штамів *Sinorhizobium meliloti* на рівень симбіозу у популяцій люцерни / Тищенко О.Д., Тищенко А.В., Біляєва І.М., Пілярська О.О., Куц Г.М. *Аграрні інновації*. 2020. №2. С. 72-82. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.2.12>
- REFERENCES:**
1. Aalipour, H., Nikbakht, A., Etemadi, N., Rejali, F., & Soleimani, M. (2020). Biochemical response and interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria during establishment and stimulating growth of *Arizona cypress* (*Cupressus arizonica* G.) under drought stress. *Sci Hortic.*, 261:108923. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.10892>
  2. Ahmad, M., Zahir, Z.A., Khlid, M., Nazls, F., & Arshad, M. (2013). Efficacy of *Rhizobium* and *Pseudo monas* strains to improve physiology, ionic balance and quality of mung bean under salt-affected conditions on farmer's field. *Plant Physiol Biochem*, 63, 170-176. doi: 10.1016/j.plaphy.2012.11.024.
  3. Ali, M.A., Naveed, M., Mustafa, A., & Abbas, A. (2017). The Good, the Bad, and the Ugly of Rhizosphere Microbiome. In: Kumar, V., Kumar, M., Sharma, S., Prasad, R. (eds) *Probiotics and Plant Health*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2_11).
  4. Al-Karaki, G.N. (2006). Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulture*, 109(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.019>
  5. Anand, K., Kumari, B., & Mallick, M.A. (2016). Phosphate solubilizing microbes: An effective and alternative approach as bio-fertilizers. *Int. J. Pharm. Sci.*, 8(2), 37-40
  6. Azcon, R., Rubio, R., & Barea, J.M. (1991). Selective interactions between different species of mycorrhizal fungi and *Rhizobium meliloti* strains, and their effects on growth, N<sub>2</sub> fixation (<sup>15</sup>N) and nutrition of *Medicago sativa* L. *New Phytologist*, 117, 399-404. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.tb00003.x>
  7. Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., & Praslickova, D. et al. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Front. Plant Sci.*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
  8. Bago, B., Philip, E. Pfeffer, & Yair, Shachar-Hill. (2000). Carbon Metabolism and Transport in Arbuscular Mycorrhizas. *Plant Physiol*, 124(3), 949-58. doi: 10.1104/pp.124.3.949
  9. Barea, J.M., Tobar, R.M., & Azcon-Aguilar, C. (1996) Effect of a genetically modified *Rhizobium meliloti* inoculant on the development of arbuscular mycorrhizas, root morphology, nutrient uptake and biomass accumulation in *Medicago sativa*. *New Phytol.*, 134(2), 361-369. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb04641.x>
  10. Benaffari, W., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-El-Mokhtar, M., & Ait-Rahou, Y. et al. (2022). The native arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost-based organic amendments enhance soil fertility, growth performance, and the drought stress tolerance of quinoa. *Plants*, 11, 393. <https://doi.org/10.3390/plants11030393>
  11. Besserer, A., Puech-Pages, V., Kiefer, P., Gomez-Roldan, V., Jauneau, A., & Roy, S., et al. (2006). Strigolactones stimulate arbuscular mycorrhizal fungi by activating mitochondria. *PLoS*, 4(7):e226. DOI: 10.1371/journal.pbio.0040226.
  12. Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat Commun*, 1, 48. <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>
  13. Brar, B., Bala, K., Saharan, B.S., Sadh, P.K., & Duhan, J.S. (2024). Bio-boosting agriculture: Harnessing the potential of fungi-bacteria-plant synergies for crop improvement. *Discov. Plants*, 1, 21. <https://doi.org/10.1007/s44372-024-00023-0>
  14. Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J.W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
  15. Choudhary, D.K., Sharma, K.P., & Gaur, R.K. (2011). Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems. *Biotechnol Lett*, 33, 1905–1910. <https://doi.org/10.1007/s10529-011-0662-0>.
  16. Compant, S., Brion, D., Jerzy, N., Christophe, C., & Essaid, A.B. (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Appl Environ Microbiol.*, 71(9), 4951–4959. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005>.
  17. Dalpé, Y., & Monreal, M. (2004). Arbuscular mycorrhiza inoculum to support sustainable cropping systems. Online. *Crop Management*, 3 (1). doi:10.1094/CM-2004-0301-09-RV
  18. Dar, G.H., Zargar, M.Y., & Beigh, G.M. (1997). Biocontrol of Fusarium root-rot in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by using symbiotic *Glomus mosseae* and *Rhizobium leguminosarum*. *Microb Ecol.*, 34, 74–80. <http://dx.doi.org/10.1007/s002489900036>
  19. de Novais, C.B., Avio, L., Giovannetti, M., de Faria, S.M., & Siqueira, J.O. et al. (2019). Interconnectedness, length and viability of arbuscular mycorrhizal mycelium as

- affected by selected herbicides and fungicides. *Appl. Soil Ecol.*, 143, 144–152. doi: 10.1016/j.apsoil.2019.06.013
20. Demenois, J., Rey, F., Ibanez, T., Stokes, A., & Carriconde, F. (2018). Linkages between root traits, soil fungi and aggregate stability in tropical plant communities along a successional vegetation gradient. *Plant Soil*, 424, 319–334. doi: 10.1007/s11104-017-3529-x
  21. Demir, S., Danesh, Y.R., Durak, E.D., Najafi, S., & Boyno, G. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture. *Plant and Soil Microbiome*, 71-100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19150-3.00017-5>.
  22. Dey, R., Pal, K.K., Bhatt, D.M., & Chauhan, S.M. (2004). Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiol. Res.*, 159(4), 371–394. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.004>.
  23. Dhaliwal, S.S., Sharma, V., & Shukla, A.K. (2022). Impact of micronutrients in mitigation of abiotic stresses in soils and plants – A progressive step toward crop security and nutritional quality. *Advances in Agronomy*, 173, 1-78. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.001>.
  24. Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P.I., Fall, D., & Hoher, V. et al. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*, 12(10), 370. <https://doi.org/10.3390/d12100370>
  25. Dighton, J. (2009). Mycorrhizae *Encyclopedia of Microbiology* (Third Edition). 153-162. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00327-8>.
  26. Fukami, J., Cerezini, P. & Hungria, M. (2018). *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Expr*, 8, 73. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>.
  27. Gao, X., Lu, X., Wu, M., Zhang, H., & Pan, R. et al. (2012). Co-Inoculation with Rhizobia and AMF Inhibited Soybean Red Crown Rot: From Field Study to Plant Defense-Related Gene Expression Analysis. *Defense-Related Gene Expression Analysis*. *PLoS One*, 7(3):e33977. doi: 10.1371/journal.pone.0033977.
  28. Ghazi, N. Al-Karaki. (2006). Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulture*, 109(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.019>
  29. Gill, S.S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem*, 48(12), 909-930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
  30. Gomathy, M., Sabarinathan, K.G., Priya, J., Ananthi, K., & Dilip, S. (2024). Synergistic Interactions of PGPR and AM Fungi in Enhancing Crop Productivity – A Winning Microbial Combination. *Int J Environ Sci Nat Res*, 33(3): 556365. DOI: 10.19080/IJESNR.2024.33.556365
  31. Good, A. (2018). Toward nitrogen-fixing plants. *Science*, 359(6378), 869-870. DOI: 10.1126/science.aas8737.
  32. Goswami, D., Thakker, J.T., Pinakin, C., Dhandhukia, P.C., & Moral, M.T. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500>
  33. Han, H.S., Supanjani, Lee, K.D. (2006). Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant Soil and Environment*, 52(3), 130-136. Doi: 10.17221/3356-PSE.
  34. Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. *Bacteria*, 3(2), 59-65. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>.
  35. Hashem, A., Abd Allah E.F., Alqarawi A.A., Al-Huqail A.A., & Wirth S. et al. (2016) The Interaction between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Endophytic Bacteria Enhances Plant Growth of *Acacia gerrardii* under Salt Stress. *Front. Microbiol.*, 7, 1089. doi: 10.3389/fmicb.2016.01089.
  36. Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann Microbiol*, 60, 579–598. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1>.
  37. Isidra-Arellano, M.C., Delaux, P.M., & Valds-Lpez, O. (2021). The Phosphate Starvation Response System: Its Role in the Regulation of Plant-Microbe Interactions. *Plant Cell Physiol.*, 62(3), 392–400. doi: 10.1093/pcp/pcab016.
  38. Juniper, S., & Abbott, L.K. (2006). Soil salinity delays germination and limits growth of hyphae from propagules of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 16(5), 371–379. DOI: 10.1007/s00572-006-0046-9.
  39. Kaur, S., Singla, P., & Muskaan, S. (2020). Interactive Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizobium on Growth and Nutrient Content of *Arachis Hypogaea*. *International Journal of Sustainable Agricultural Research, Conscientia Beam.*, 7(4), 211-227. DOI: 10.18488/journal.70.2020.74.211.227
  40. Kebede, E. (2021). Contribution, Utilization, and Improvement of Legumes-Driven Biological Nitrogen Fixation in Agricultural Systems. *Front. Sustain. Food Syst. Sec. Agroecology and Ecosystem Services*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998>.
  41. Khoshru, B., Mitra, D., Khoshmanzar, E., Myo, E.M., & Uniyal, N. et al. (2020). Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: An economic valuable resource for the agriculture revival under stressful conditions. *J. Plant Nutr.*, 43 (20), 3062–3092. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1799004>
  42. Kiers, E.T., Duhamel, M., Beesetty, Y., Mensah, J.A., & Franken, O. et al. (2011). Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *SCIENCE*, 333(6044), 880-882. DOI: 10.1126/science.1208473.
  43. Kloepper, J.W., Lifshitz, R., & Zablotowich, R.K. (1989). Free living bacterial inocula for enhancing crop productivity. *Trends Biotechnol.*, 7(2), 39-44. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(89\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0167-7799(89)90057-7).
  44. Lehmann, J., Hansel, C. M., Kaiser, C., Kleber, M., & Maher, K., et al. (2020). Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nat. Geosci*, 13, 529–534. doi: 10.1038/s41561-020-0612-3
  45. Li, J., Meng, B., Chai, H., Yang, X., & Song, W. et al. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in C3 (*Leymus chinensis*) and C4 (*Hemarthria altissima*) grasses via altering antioxidant enzyme activities and photosynthesis. *Front. Plant Sci.*, 10, 499. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00499>
  46. Liu, X.Q., Xie, M.M., Hashem, A. Abd-Allah E.F., & Wu Q-S. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi and



- rhizobia synergistically promote root colonization, plant growth, and nitrogen acquisition. *Plant Growth Regul.*, 100, 691–701. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00966-60>.
47. Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. In book: *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. DOI:10.1007/978-981-10-9044-8\_7.
  48. Marschner, H., & Dell, B. (1994). Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant Soil.*, 159, 89–102 <https://doi.org/10.1007/BF00000098>.
  49. Mathew, K. Joseph, M.K., & Topno, S. (2024). Effect of biofertilizer and photosynthetic bacteria on growth, yield and quality of Strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. winter dawn. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(7), 541–544. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i7Sh.1127>.
  50. Meng, L., Zhang, A., Wang, F., Han, X., & Wang, D. et al. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen uptake and transfer in soybean/maize intercropping system. *Front. Plant Sci., Sec. Plant Nutrition*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00339>.
  51. Mirdhe, R.M., & Lakshman, H.C. (2014). Synergistic interaction between Arbuscular mycorrhizal fungi, Rhizobium and phosphate solubilising bacteria on *Vigna unguiculata* (L) Verdc. *Int. J. Bioassays*, 3(05), 2096–2099.
  52. Morris, E.K., Morris, D.J.P., Vogt, S., Gleber, S.-C., & Bigalke, M. et al. (2019). Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi. *ISME J.*, 13, 1639–1646. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0369-0>.
  53. Nanjundappa, A., Bagyaraj, D.J., Saxena, A.K. Kumar M., & Chakdar, H. (2019). Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. *Fungal Biol Biotechnol*, 6, 23. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0086-5>.
  54. Naveed, M., Mitter, B., Reichenauer, T.G., Wieczorek, K., & Sessitsch, A. (2014). Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by Burkholderia phytofirmans PsJN and Enterobacter sp. FD17. *Environmental and Experimental Botany*, 97, 30–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.014>.
  55. Ndoye, F., Kane, A., Diedhiou, A.D., Bakhoun, N., & Fall, D. et al. (2015). Effects of dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on *Acacia senegal* (L.) Willd. seedling growth and soil enzyme activities in senegal. *Int. J. Biosci*, 6(2), 36–48. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/6.2.36-48>.
  56. Newsham, K.K., Fitter, A.H., & Watkinson, A.R. (1995). Multi-functionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. *Trends Ecol. Evol.*, 10(10), 407–411. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89157-0](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89157-0).
  57. Olaniyan, F.T., Alori, E.T., Adekiya, A.O., Ayorinde B.B., & Daramola F.Y. et al. (2022). The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. *Ann Microbiol*, 72, 45. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01701-8>.
  58. Ortas, I., Kaya, Z., & Çakmak, I. (2001). Influence of arbuscular mycorrhizae inoculation on growth of maize and green pepper plants in phosphorus- and zinc-deficient soil. In: Horst, W.J., et al. *Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences*, 92. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/0-306-47624-X\\_306](https://doi.org/10.1007/0-306-47624-X_306).
  59. Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nat Rev Microbiol*, 6, 763–775. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>.
  60. Pepe, A., Giovannetti, M., & Sbrana, C. (2016). Different levels of hyphal self-incompatibility modulate interconnectedness of mycorrhizal networks in three arbuscular mycorrhizal fungi within the Glomeraceae. *Mycorrhiza*, 26, 325–332. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0671-2>.
  61. Pintó-Marijuan, M., & Munné-Bosch, S. (2014). Photo-oxidative stress markers as a measure of abiotic stress-induced leaf senescence: advantages and limitations. *Exp Bot*. 65(14), 3845–3857. doi: 10.1093/xb/eru086.
  62. Plenchette, C., C. Meynard, J. M., Fortin, J. A. (2005). Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Can J. Plant Sci.*, 85(1), 31–40. <https://doi.org/10.4141/P03-159>.
  63. Porcel, R., & Ruíz-Lozano, J.M. (2004). Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *J. Exp Bot.*, 55, 1743–1750.
  64. Prajapati, K., & Modi, H.A. (2012). The Importance of Potassium in Plant Growth – A Review. *Indian Journal of Plant Sciences*, 2-3, 177–178.
  65. Praveen, S. (2019). Chemistry of potassium availability in soil. *International Journal of Chemical Studies*, 7(1), 1916–1918.
  66. Requena, N., & Breuninger, M. (2004). The Old Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in the Light of the Molecular Era. In book: *Progress in Botany*, 65. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18819-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18819-0_13).
  67. Requena, N., Serrano, E., Ocón, A., & Breuninger, M. (2007). Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhizal establishment. *Phytochemistry*, 68(1), 33–40. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.09.036.
  68. Riaz, U., Murtaza, G., Anum, W., Samreen, T., & Sarfraz, M. et al. (2021). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizers and Biopesticides. In: Hakeem, K.R., Dar, G.H., Mehmood, M.A., Bhat, R.A. (eds) *Microbiota and Biofertilizers*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3_11).
  69. Ruiz-Lozano, J.M., Collados, C., Barea, J.M., & Azcón, R. (2001). Arbuscular mycorrhizal symbiosis can alleviate drought induced nodule senescence in soybean plants. *New Phytologist*, 151(2), 493–502. <http://dx.doi.org/10.1046/j.0028-646x.2001.00196.x>.
  70. Saheewala, H., Sanadhya, S., Upadhyay, S.K., Mohanty, S.R., & Jain, D. (2023). Polyphasic Characterization of Indigenous Potassium-Solubilizing Bacteria and Its Efficacy Studies on Maize. *Agronomy*, 13(7), 1919. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071919>.
  71. Sbrana, C., & Giovannetti, M. (2005). Chemotropism in the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycorrhiza*, 15, 539–545. <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0362-5>.
  72. Singh, A.K., Zhu, X., Chen, C., Wu, J., & Yang, B. et al. (2020). The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 52(9), 1604–1638. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1862561>.
  73. Sini, H.N., Barzegar, R., Mashaei, S.S., Ghahsare, M.G., & Mousavi-Fard, S. et al. (2024). Effects of biofertilizer

- on the production of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) in greenhouse. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101060>.
74. Smith, S.E., Smith, F.A., & Jakobsen, I. (2003). Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiol.*, 133(1), 16-20. <https://doi.org/10.1104/pp.103.024380>.
  75. Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F.A. (2011). Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. *Plant Physiology*, 156(3), 1050–1057. <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>.
  76. Soumare, A., Diop, T., Manga, A., & Ndoye, I. (2015). Role of arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen fixing bacteria on legume growth under various environmental stresses. Abdoulaye Soumare. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 7(4), 31-46. DOI:10.12692/ijb/7.4.31-46
  77. Stancheva, I., Geneva M., Zehirov, G., Tsvetkova, G., & Hristozkova, M. et. al. (2006). Effects of combined inoculation of Pea plants with arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* on nodule formation and nitrogen fixing activity. *Gen. Appl. Plant physiology, special issue*, 61-66
  78. Stefan, M., Munteanu, N., Stoleru, V., Mihasan, M., & Hritcu, L. (2013). Seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria enhances yield of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Sci. Hortic.*, 151, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.006>.
  79. Tajini, F., Trabelsi, M., & Drevon, J.J. (2011). Combined inoculation with *Glomus intraradices* and *Rhizobium tropici* CIAT899 increases phosphorus use efficiency for symbiotic nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Saudi J Biol Sci.*, 19(2), 157–163. doi: 10.1016/j.sjbs.2011.11.003.
  80. Kashif Tanwir, Saghir Abbas, Muhammad Shahid, Hassan Javed Chaudhary, Muhammad Tariq Javed. (2023). Mycorrhizal Symbiosis and Nutrients Uptake in Plants. *Plant Ionomics: Sensing, Signaling, and Regulation*. <https://doi.org/10.1002/9781119803041.ch5>.
  81. Tavasolee, A., Aliasgharzad, N., Salehijouzani, G., Mardi, M., & Asgharzadeh A. (2011). Interactive effects of Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobial strains on chickpea growth and nutrient content in plant. *African Journal of Biotechnology*, 10(39), 7585-7591. DOI: 10.5897/AJB10.2412.
  82. Tian, F., Ding, Y., Zhu, H., Yao, L., & Du, B. (2009). Genetic diversity of siderophore-producing bacteria of tobacco rhizosphere. *Brazil. J. Microbiol.*, 40, 276–284. doi: 10.1590/S1517-838220090002000013.
  83. Uarota, V.G. et al. (2021). Plant-Rhizobacteria Communications with the Antioxidant System. In: Singh, H.B., Vaishnav, A., Sayyed, R. (eds) *Antioxidants in Plant-Microbe Interaction*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0_3).
  84. Uribe, D., Sánchez-Nieves, J., & Vanegas, J. (2010). Role of Microbial Biofertilizers in the Development of a Sustainable Agriculture in the Tropics. In: Dion, P. (eds) *Soil Biology and Agriculture in the Tropics*. *Soil Biology*, 21. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-05076-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-05076-3_11).
  85. Verma, A., Patidar, Y., & Vaishampayan, A. (2016). Isolation and purification of potassium solubilizing bacteria from different regions of India and its effect on crop's yield. *Indian J. Microbiol. Res.*, 3(4), 483-488. DOI: 10.18231/2394-5478 .2016.0029.
  86. Vincze, E.B., Becze, A., Laslo, E., & Mara, G. (2024). Beneficial Soil Microbiomes and Their Potential Role in Plant Growth and Soil Fertility. *Agriculture*, 14(1), 152. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010152>.
  87. Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., & Zaman, W. et al. (2023). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, and Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic and Biotic Stresses. *Plants*, 12(17), 3102. doi: 10.3390/plants12173102
  88. Wang, Q., Liu, M., Wang, Z., Li, J., & Liu, K. et al. (2023). The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant abiotic stress. *Sec. Microbial Symbioses*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1323881>.
  89. Xie, M.-M., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., Zhang, Z.-Z., & Kuča, K. (2020). Single or dual inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia regulates plant growth and nitrogen acquisition in white clover. *Plant Soil Environ.*, 66, 287–294. <https://doi.org/10.17221/234/2020-PSE>.
  90. Yang, S.Y., Gronlund, M., Jakobsen, I., Grotemeyer, M.S., Rentsch, D. et al. (2012). Salamin Nonredundant regulation of rice arbuscular mycorrhizal symbiosis by two members of the phosphate transporter gene family. *Plant Cell.*, 24(10), 4236–4251. doi: 10.1105/tpc.112.104901.
  91. Yeremko, L., Czopek, K., Staniak, M., Marenych, M., & Hanhur, V. (2025). Role of Environmental Factors in Legume-*Rhizobium* Symbiosis: A Review. *Biomolecules*, 15(1), 118. doi: 10.3390/biom15010118.
  92. Yu, L., Zhang, H., Zhang, W., Han, B., & Zhou, H. et al. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Alter the Interaction Effects Between *Bacillus* and *Rhizobium* on Root Morphological Traits of *Medicago ruthenica* L. *J. Soil Sci Plant Nutr.*, 23, 2868–2877. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01242-2>.
  93. Zhu, L., Bai, Y., Zhang, L., Si, W., & Wang, A. et al. (2023). Water-land-food nexus for sustainable agricultural development in main grain-producing areas of North China. *Food*, 12(4), 712. <https://doi.org/10.3390/foods12040712>.
  94. Hospodarenko, H.M. (2024). *Ahrokhimiia [Agrochemistry]*. Uman, 572 [in Ukrainian].
  95. Kots, S.I.a. (2021). Biologichna fiksatsiia azotu: dosiahnennia ta perspektivy rozvytku [Biological nitrogen fixation: achievements and development prospects]. *Fiziolohiia roslyn i henetyka*, 53(2), 128-159. <https://doi.org/10.15407/frg2021.02.128> [in Ukrainian].
  96. Nikolaichuk, V.I., & Belchhazi, V.I. (2005). *Fiziolohiia i biokhimiia roslyn [Plant physiology and biochemistry]*. Uzhhorod, 192 [in Ukrainian].
  97. Tyshchenko, O.D., et al. (2017). *Naukovo-metodychni zasady selektsii ta nasinnnytstva liutserny v umovakh zroshennia [Scientific and methodological principles of alfalfa breeding and seed production under irrigation conditions]*. Kherson: FOP Hrin D.S., 236 [in Ukrainian]
  98. Tyshchenko, O.D. et al. (2020). Vplyv riznykh shtamiv Sinorhizobium meliloti na riven symbiozu u populatsii liutserny [The effect of different strains of Sinorhizobium meliloti on the level of symbiosis in alfalfa populations]. *Ahrarni innovatsii*, 2, 72-82. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.2.12> [in Ukrainian].

Тищенко А.В., Тищенко О.Д., Пілярська О.О., Очкала О.С. Роль мікроорганізмів у сільському господарстві в умовах дефіциту ресурсів та зміни клімату – огляд

**Вступ.** Зміна клімату, нестача ресурсів та водночас їх збереження ставлять перед сільським господарством нові завдання для забезпечення продовольчої безпеки. Широке використання мікроорганізмів дозволить вирішити цю проблему. Взаємодія рослин і бактерій у ризосфері відбувається через безліч процесів, але головними є ті, що визначають ріст і розвиток рослин та родючість ґрунту. **Результати.** Ризобактерії PGPR проявляють свій благотворний вплив по-різному, або стимулюють природні процеси для посилення та підвищення поглинання поживних речовин та їх засвоєння і синтезують певні сполуки для рослин, чи запобігають та захищають рослини від хвороб і сприяють підвищенню їх стійкості до абіотичного стресу рослини за допомогою таких процесів, як синтез фітогормонів, фіксація азоту, солюбілізація фосфатів і біоконтроль захворювань. Встановлення симбіотичних відносин з азотфіксуючими бактеріями результатом якого, є важливий процес біологічної азотфіксації, де атмосферний азот повітря перетворюється на аміак ( $\text{NH}_3$ ), доступну форму азоту для рослин та завдяки цьому процесу бобові культури щорічно здатні фіксувати приблизно від 100 до 300 кг/га атмосферного азоту ( $\text{N}_2$ ) при правильному підборі сорт-штам. Крім того, за допомогою процесу солюбілізації фосфату, PGPR розчиняють фосфор та інші мінеральні поживні речовини, цим підвищують їх доступність для рослин. Мікроорганізми (PSM), особливо фосфатсолюбізуючі бактерії (PSB), що солюбілізують фосфат, відіграють дуже важливу роль у живленні рослин фосфором. До того ж, є бактерії, що розчиняють калій (KSB). Ризобактерії також здійснюють біоконтроль захворювань, вони продукують сидерофори і окрім покращення стану рослин і живлення залізом, вони ще пригнічують ріст інших мікроорганізмів зокрема, перешкоджають росту патогенів, шляхом обмеження доступу патогену до заліза. Арбускулярні мікоризні гриби (AMF) можуть співіснувати з більш ніж 70-90% видами рослин для встановлення симбіотичних стосунків, із стійким симбіозом між ними. У симбіозі, рослини-господарі забезпечують гриби AM джерелом органічного вуглецю, і контролюється як рослиною, так і грибом, щоб підтримувати стабільні симбіотичні стосунки. Рослини-господарі обирають найкращих партнерів для симбіозу та постачають їм більшу кількість вуглеводів в обмін, отриманих від грибів, більше мінеральних поживних речовин. У таких мутуалістичних стосунках, мікоризний гриб сприяє більшому поглинанню поживних речовин рослинами-господарями (фосфор, вода та мінерали) за рахунок збільшення кореневої системи та рослини, які колонізовані AMF, мають кращу стійкість до екологічних стресів, таких як посуха, холод, забруднення. **Висновок.** Правильний підбір ризобактерій, AMF та рослин-господаря, при їх спільному застосуванні, може забезпечити високий синергічний ефект за різними ознаками та властивостями (рівень симбіотичної азотфіксації, активізація загальної захисної системи рослини, архітектура кореня, продуктивність).

**Ключові слова:** ризобактерії, AMF, фіксація азоту, солюбілізація фосфору, сидерофори, біоконтроль захворювань.

Tyshchenko A.V., Tyshchenko O.D., Piliarska O.O., Ochka O.S. The role of microorganisms in agriculture under resource scarcity and climate change – a review

**Introduction.** Climate change, resource scarcity and at the same time their conservation pose new challenges to agriculture to ensure food security. The widespread use of microorganisms will solve this problem. The interaction of plants and bacteria in the rhizosphere occurs through many processes, but the main ones are those that determine the growth and development of plants and soil fertility. **Results.** PGPR rhizobacteria exert their beneficial effects in different ways, either stimulating natural processes to enhance and increase the absorption of nutrients and their assimilation and synthesizing certain compounds for plants, or preventing and protecting plants from diseases and contributing to increasing their resistance to abiotic stress of plants through processes such as the synthesis of phytohormones, nitrogen fixation, phosphate solubilization and biocontrol of diseases. Establishing a symbiotic relationship with nitrogen-fixing bacteria results in the important process of biological nitrogen fixation, where atmospheric nitrogen is converted into ammonia ( $\text{NH}_3$ ), a form of nitrogen available to plants, and thanks to this process, legumes are able to fix approximately 100 to 300 kg/ha of atmospheric nitrogen ( $\text{N}_2$ ) annually with the right variety-strain selection. In addition, through the process of phosphate solubilization, PGPR dissolve phosphorus and other mineral nutrients, thereby increasing their availability to plants. Microorganisms (PSM), especially phosphate-solubilizing bacteria (PSB), which solubilize phosphate, play a very important role in plant phosphorus nutrition. In addition, there are potassium-solubilizing bacteria (KSB). Rhizobacteria also carry out biocontrol of diseases, they produce siderophores and in addition to improving plant health and iron nutrition, they also inhibit the growth of other microorganisms, in particular, they prevent the growth of pathogens, by limiting the pathogen's access to iron. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can coexist with more than 70-90% of plant species to establish symbiotic relationships, with a stable symbiosis between them. In the symbiosis, the host plants provide the AM fungi with a source of organic carbon, and it is controlled by both the plant and the fungus to maintain a stable symbiotic relationship. Host plants choose the best partners for symbiosis and supply them with more carbohydrates in exchange, obtained from fungi, more mineral nutrients. In such mutualistic relationships, the mycorrhizal fungus promotes greater absorption of nutrients by host plants (phosphorus, water and minerals) by increasing the root system and plants colonized by AMF have better resistance to environmental stresses such as drought, cold, pollution. **Conclusion.** The correct selection of rhizobacteria, AMF and host plants, when used together, can provide a high synergistic effect on various traits and properties (level of symbiotic nitrogen fixation, activation of the general plant defense system, root architecture, productivity).

**Key words:** rhizobacteria, AMF, nitrogen fixation, phosphorus solubilization, siderophores, disease biocontrol.