

5.2 Роль біодобрих для розвитку сталого та екологічного сільського господарства України

Вступ. Зростання населення та виснаженням природних ресурсів викликає необхідність підвищення продуктивності сільського господарства сталим та екологічно чистим способом. У традиційних методах ведення сільського господарства використовується велика кількість хімічних добрив для збільшення врожайності сільськогосподарських культур, що загрожує агроєкосистемам, наприклад, забруднення харчового ланцюга, погіршення якості ґрунту, забруднення води. Щоб подолати ці проблеми, необхідно перейти до сталих методів ведення сільського господарства [212].

Одним з таких методів є використання біопрепаратів для ефективного вирощування сільськогосподарських культур. Основна мета застосування біопрепаратів – зниження дефіциту природних мікроорганізмів, які були втрачені рослинами і ґрунтом протягом багатьох років проведення тотальної хімізації та агресивної механізації в аграрних технологіях. Під час використання біопрепаратів активно проходить заселення ґрунту та рослин мікроорганізмами, що є корисними для них. Результатом цього процесу є підвищення біологічної активності ґрунту, а також його родючості, рослини в свою чергу формують так званий «захисний екран», що складається з корисних мікроорганізмів. Також повертається взаємозв'язок і співпраця рослин, ґрунту та мікроорганізмів, це дає змогу забезпечити підвищення урожайності сільськогосподарських культур та досягти їх гармонійного розвитку. Особливо актуальне використання біопрепаратів восени, у зв'язку з наростаючою кількістю фітопатогенів в ґрунті та наближенням низьких температур. З огляду на це, багато компаній виробників біодобрив виводять на ринок ефективні біологічні препарати такі, як біофунгіциди, препарати для живлення та захисту, препарати для підвищення родючості ґрунту, біоприлиплювачі та біоклеї та інше. Всі ці біопрепарати призначені для вирішення різних завдань сільгоспвиробників у галузі рослинництва [213].

Потрібно також зауважити, що використання біопрепаратів не альтернатива сучасним агротехнологіям, але вони є суттєвою допомогою у підвищенні їх ефективності. Підвищення тільки натрію (N), фосфору (P) і калію (K) не може дати стовідсотковий результат.

Дія біологічних препаратів за обробки насіння базується на утворенні захисного бар'єру з живих корисних мікроорганізмів та подальшій злагодженій співпраці по живленню та захисту рослин. За обробки ґрунту Біодеструкторами живі мікроорганізми, що входять до їхнього складу, займають цю нішу і не дають розмножуватись патогенам. Крім того, за рахунок дії ферментних систем означених мікроорганізмів, рослинні рештки перетворюються на поживні елементи, доступні рослинам. Мікроорганізми біодеструкторів також покращують і мінеральне живлення рослин азотом, фосфором, калієм, залізом тощо за рахунок азотфіксації атмосферного азоту, мобілізації нерозчинних мінералів ґрунту, в тому числі фосфатів та деструкції високомолекулярних органічних речовин. За обробки біопрепаратами по вегетативній масі досягається місцева дія біологічно активних речовин. В результаті знімаються стреси, покращується та зміцнюється загальний стан рослин [214].

Тобто, біопрепарати необхідні для більш міцних здорових сходів, котрі дають поштовх до утворення міцної рослини, яка складається з добре розвинутої розгалуженої кореневої системи та наземної частини, міцних покривів, стійких до різних стресів та ураження шкідниками і збудниками хвороб. Обробка по вегетативній масі збільшує листову поверхню, кількість хлорофілу, а отже і накопичення цукрів. Вони відкладаються в рослині у вигляді крохмалю, простих цукрів, а витрачаються на енергетичні процеси. Чим більша енергетика тим краща можливість для росту та продуктивності рослин, чим більше накопичується білкових речовин та вітамінів тим менше відкладаються напівпродукти, такі, як, наприклад, нітрати. Все це слугує на користь якості отриманої продукції [215].

Використання біопрепаратів з мікробами, що стимулюють ріст рослин у своєму складі (в англomовних джерелах Plant Growth Promoting Microbes –

PGPM), замість звичайних хімічних добрив, допоможе відновити агроєкосистеми.

Такі бактерії оселяються у ґрунті та мають зв'язок з ризосферою рослин, де вони стимулюють зростання та продуктивність цих рослин різними прямими та непрямыми механізмами, наприклад, за допомогою фітогормонів, сидерофорів, розчинення мінералів. Бактерії використовуються для забезпечення поживними речовинами ґрунту для сільськогосподарських культур без шкоди для родючості ґрунту екологічно стійким способом [216].

Біодобрива включають різні мікроорганізми, такі як різні види бактерій, гриби, синьо-зелені водорості (ціанобактерії), водорості, а також їх метаболіти, які використовуються як добрива. Їх можна визначити як штучно створені культури ґрунтових мікробів або ґрунтові інокулянти для підвищення родючості та продуктивності ґрунту та рослин [217].

Попередні дослідження показали позитивний вплив бактерій на зростання та врожайність різних сільськогосподарських культур у різних кліматичних умовах, типах ґрунтів, а також в умовах біотичного та абіотичного стресу. Крім того, ці бактерії також успішно використовуються як засоби біологічної боротьби з різними патогенами в рослинах. В роботі представлено огляд різних механізмів, що використовуються цими бактеріями як стимулятори росту, та ролі, що виконується як агенти біологічного контролю для підвищення продуктивності, а також допоміжної ролі, яку відіграють у сталому та екологічно чистому сільському господарстві, не надаючи жодного негативного впливу. на навколишнє середовище та життя і здоров'я організмів [218].

5.2.1 Стан та перспективи розвитку біологічного землеробства

Наприкінці другого тисячоліття науковці й світова спільнота почали багато уваги приділяти проблемі екології землеробства, як засадничої складової виробництва здорових продуктів харчування. Тому, все частіше актуальним стає повернення до методів господарювання без використання засобів хімічного захисту рослин та мінеральних добрив із застосуванням в якості добрив сировинних залишків і відходів органічного походження, а також природних

засобів захисту рослин. На всіх ланках від сільськогосподарської науки до виробників рослинної та плодоовочевої продукції України все частіше використовуються такі терміни, як біологічне, органічне, екологічне та біодинамічне землеробство. Ці моделі ґрунтуються на всебічному розумінні усіх процесів, що відбуваються в агроєкосистемах, вони спрямовані на відновлення родючості ґрунтів, поліпшення їх будови, зменшення токсичності та сприяють утворенню стійких в екологічному відношенні агроландшафтів.

З огляду на окреслену проблему до основних причин підвищеної уваги до екологічно безпечних форм господарювання у світі можна віднести такі:

- надмірне використання хімічних речовин протягом декількох десятиліть, починаючи із середини ХХ століття, призвело до значної шкоди навколишньому середовищу (підвищення токсичності ґрунтів, ерозія та погіршення їх родючості, виснаження природних ресурсів в загальному);

- значне підвищення цін на енергоресурси: кошти, що витрачаються на виробництво штучних мінеральних добрив і синтетичних пестицидів, в деяких випадках перевищує кошти отримані внаслідок продажу отриманих врожаїв;

- зниження доходів сільськогосподарських виробників;

- зміна суспільної думки споживачів щодо продукції, вирощеної із застосуванням хімічних добрив;

- підвищення попиту на екологічно безпечну для здоров'я людей продукцію [219].

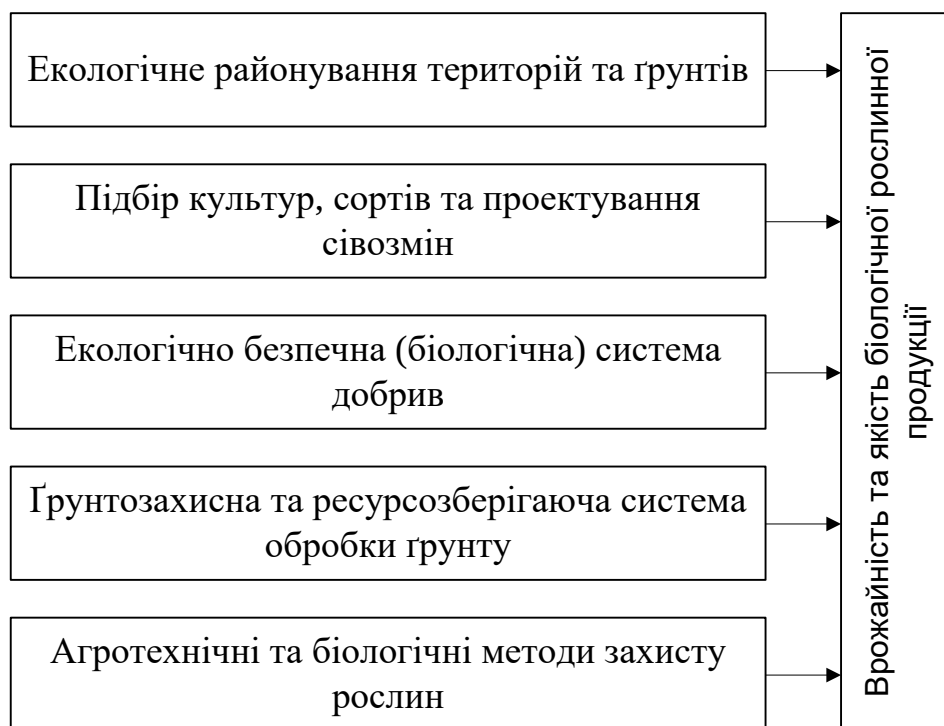
Альтернативним методом ведення сільського господарства у світі стає біологічне землеробство, яке поступово створює можливості для задоволення попиту споживачів на екологічно безпечні продукти харчування, який в останні роки постійно зростає. Країнами, що мають найбільші ринки органічної продукції в світі є Сполучені Штати Америки (48,6 млрд євро), Німеччина (15,9 млрд євро) та Франція (12,7 млрд євро). Країни з найвищим рівнем споживання на душу населення це Данія, Швейцарія, та Люксембург. Найбільші частки ринку органічної продукції спостерігаються у Данії, Швейцарії та Австрії [220]. Така структура споживання органічної продукції у світі дає змогу

стверджувати, що попит і пропозиція органічної продукції визначається рівнем економічного розвитку країн.

На сьогодні в Україні розвитком цього напрямку сільського господарства займаються: асоціація «Чиста Флора» (створена в 2011 році), Федерація органічного руху України (створена в 2005 році), міжнародна громадська асоціація виробників органічної продукції «БІОЛан Україна» (рік заснування 2002), об'єднання «Полтава-органік» (створене у 2010 році), спілка учасників органічного агровиробництва «Натурпродукт», а у 2007 році в Україні розпочав свою діяльність «Органік стандарт» – перший акредитований та сертифікаційний орган в країні, який займається сертифікацію органічного виробництва [221]. Розвиток біологічного сільського господарства в Україні, як і в багатьох інших країнах з низьким рівнем розвитку економіки, не має масового поширення, а темі органіки приділяється не достатньо уваги. Причиною цього є менша врожайність сільськогосподарських культур в порівнянні з інтенсивним землеробством. Тому, більша частина господарств у світі ще протягом досить тривалого часу спеціалізуватиметься на веденні землеробства із використанням хімічних добрив, метою яких є одержання надприбутків від продажу більших обсягів сільськогосподарської продукції [222].

Велика кількість вітчизняних науковців в своїх дослідженнях приділяють увагу впровадженню та розвитку біологічного виробництва в Україні, однак у більшості праць, в першу чергу економічного спрямування, визначаються основні методи та засади ведення біологічного землеробства та обґрунтовується доцільність його масштабного впровадження [221, 223]. Натомість недостатньо дослідженими лишаються технологічні, біологічні і агротехнічні аспекти цієї проблеми, в першу чергу через фінансову вартість проведення польових та лабораторних досліджень.

Головні агротехнічні чинники, що визначають можливості й перспективи ведення біологічного землеробства, представлено на малюнку 1.



Малюнок 1. Чинники біологічного землеробства

1. Першим чинником та найголовнішою ланкою виробництва біологічної продукції аграрного сектору є екологічне районування земельних угідь та паспортизація сільськогосподарських ґрунтів, придатних для вирощування органічної продукції. З цією метою всі землі повинні бути розподілені за придатністю до вирощування екологічно безпечної продукції за принципом районування:

- непридатними вважаються землі, що розміщені біля підприємств екологічно небезпечного виробництва та сміттєзвалищ, а також уздовж автомобільних магістралей з інтенсивним рухом;
- обмежено придатні, до цієї категорії потрібно віднести землі фірм аграрного спрямування з інтенсивним способом ведення землеробства;
- придатні це землі тих фермерських господарств, які розміщені на територіях, що пройшли перевірку на забрудненість та визнані придатними для розвитку біологічного землеробства.

Другим кроком є паспортизація земель, які визначені для ведення біологічного землеробства. В екологічному паспорті має бути повна інформація про стан ґрунту, його агрофізичні, хімічні, біологічні та санітарно-гігієнічні

показники, їх визначення та результати моніторингового контролю, яких є першочерговим для екологічно безпечного господарювання.

2. Другий чинник який є не менш важливим для біологічного землеробства це введення в структуру посівних площ та сівозмін однорічних і багаторічних бобових культур. За рахунок таких рослин забезпечиться вирішення з одного боку, проблеми рослинного білка, а з іншого – збагачення ґрунту азотом без внесення мінеральних азотних добрив [224].

Окрім цього деякі сільськогосподарські культури засвоюють поживні речовини із важкорозчинних фосфоровмісних сполук, зокрема такі рослини, як люпин, гірчиця біла та гречка дуже добре поглинають фосфор із таких сполук. Ці рослини перетворюють важкорозчинні форми фосфору в доступні шляхом підкислення ґрунту, що дозволяє покращити фосфорне живлення сільськогосподарських культур, які висіватимуться після них. Варто також звернути увагу на підбір стійких видів рослин їх сортів і гібридів, які можна адаптувати до ґрунтово-кліматичних умов кожного окремого господарства.

Враховуючи вищесказане можна зробити висновок, що головне місце в середині другого чинника біологічного землеробства займає сівозміна, оскільки від неї залежить вибір системи удобрення та обробітку ґрунту, системи захисту рослин від хвороб, шкідників і бур'янів, а також заходів, що запобігають ерозійним процесам ґрунту. Ігнорування сівозміни призводить до значного підвищення рівня шкідників культурних рослин, їх забур'яненості та до такого розповсюдження інфекційних хвороб рослин, як епіфітотії, що суттєво позначається на кількості та якості врожаю сільськогосподарської продукції.

3. Третім чинником біологічного землеробства є внесення добрив у полях сівозміни. Під час застосування системи землеробства, що пов'язана з інтенсивною хімізацією більшість фермерських господарств проводять внесення високих доз мінеральних добрив. У біологічному землеробстві навпаки головна роль у підживленні рослин належить органічним добривам, як традиційним, так і нетрадиційним їх видам. Серед популярних органічних добрив, що мають важливий резерв для поповнення нестачі поживних речовин у ґрунті це

наприклад солома, вермикомпост, сидеральні добрива [224].

Проте, у деяких випадках, внесення органіки без розуміння її особливостей може призвести до несподіваних наслідків. Це пов'язано з тим, що різні види добрив мають свою специфічну дію, і деякі з них є універсальними в своїй ефективності. Наприклад, солома пшениці озимої може мати свою власну специфічну дію, в той час як підстилковий гній є універсальним. Тому, під час застосування соломи чи сидеральних культур як добрива з відносно високим співвідношенням вуглецю до азоту, мікроорганізми, які розкладають рослинні залишки, можуть почати використовувати азот з ґрунту і перетворювати його в форми, які рослини не можуть негайно використовувати, аж поки це співвідношення не зменшиться. Науковцями раніше було розраховано, що для розкладу 1 тонни соломи в системі традиційного внесення добрива потрібно додатково ввести в ґрунт 8-10 кг/га мінерального азоту, тоді як для органічного внесення можна використовувати сечовину або розведений водою пташиний послід.

Слід також розуміти, що підвищення доз органічних добрив вище норми може призводити до накопичення в сільськогосподарській продукції важких металів, нітратів та інших токсичних речовин, а також до вилягання посівів. Дослідження деяких вітчизняних та зарубіжних науковців показали, що внаслідок внесення у ґрунт надмірної кількості органіки в ньому підвищується концентрація хімічних елементів в кількості, що є шкідливою для рослин. Це такі важкі метали як кадмій, свинець, цинк, мідь, марганець, залізо [225]. Також слід враховувати, що важкі метали з ґрунту виводяться дуже повільно, тому тривале надходження, навіть невеликих кількостей, свинцю або кадмію призводить до значного збільшення концентрації їх у ґрунті, яка з часом може досягати критичних показників. З цього виходить, що одним із головних правил яким повинен керуватись сільськогосподарський виробник перед внесенням органічних добрив це визначення походження органічного добрива та проведення аналізів його якісних показників.

Сидеральні посіви мають набути значного поширення в системі

біологічного землеробства задля збагачення ґрунту органічною речовиною. Це дасть змогу поліпшити фітосанітарну ситуацію в посівах та ґрунтовому середовищі, а також захистити ґрунт від вітрової та водної ерозії. Це такі сільськогосподарські культури, як, наприклад редька олійна, гірчиця біла, райграс однорічний та капуста кормова, горох овочевий або буркун білий, які, окрім підвищення вмісту органічної речовини у ґрунті, також ефективно впливають на вирівнювання азотного балансу в ґрунтовому середовищі. Останніми роками використання в якості джерела органічної речовини багаторічних трав та біоорганічних добрив набувають також важливого значення. Через функціонування землеробства України в умовах дефіциту азоту, фосфору й інших поживних речовин, а також за від'ємного балансу гумусу, необхідно впроваджувати широке застосування біопрепаратів, які створені у вітчизняних лабораторіях українськими мікробіологами, для майбутнього землеробства країни це стане першим суттєвим кроком для розвитку і фінансової прибутковості [226].

4. Четвертим чинником системи біологічного землеробства є охорона раціональне використання та наукове обґрунтування система обробітку ґрунтів. В умовах переходу господарств на біологічну систему господарювання необхідно приймати до уваги ґрунтово-кліматичні умови підприємства, присутність у ґрунті засмічень у вигляді насіння бур'янів, фінансові можливості фермерського господарства щодо придбання ґрунтообробних знарядь, ґрунтозахисних біологічних препаратів, добрив, а також біологічно-генетичні особливості рослин які планує вирощувати господарство з розумінням попередників у сівозміні. Тому, основні завдання і мета щодо проведення обробки ґрунту полягають у позиціях представлених на малюнку 2.



Малюнок 2. Завдання обробітку ґрунту у біологічному землеробстві

До загальноприйнятих біологічних заходів зменшення конкурентоспроможності бур'янів відносяться пригнічення, або затінення озимими зерновими, бобовими культурами, однорічними травами, коноплею, суданською травою, соняшником, сорго тощо [224]. Головною особливістю біологічних методів є їх дуже короткий перелік окремих бур'янів на який вони мають вплив, а засмічення посівів сільськогосподарських культур, як правило, відбувається багатьма різними видами засмічуючи рослин. Тому за допомогою методу, що базується на біологічній складовій доцільно боротися з найбільш злісними бур'янами (амброзією полинолистою, берізкою польовою, осотом польовим, гірчаком звичайним, повитицею та деякими іншими), що важко винищуються агротехнічними й хімічними методами [227].

При сучасних умовах та рівні розвитку органічного землеробства можливості використання біологічних методів боротьби з бур'янами, що базуються на застосуванні вірусів, кліщів або грибів на даний момент дуже ускладнені та обмежені через неможливість підбору таких видів шкідників, які б стримували розвиток бур'янів і не мали негативного впливу на сільськогосподарські рослини.

Біологічне землеробство також має певні складнощі в боротьбі зі

шкідниками та хворобами сільськогосподарських культур, але на сьогодні також існує ряд шкідників і хвороб, що вкрай важко знищити лише заходами пов'язаними з агротехнікою, тому доцільність застосовувати методів, що є нешкідливими для навколишнього середовища стає актуальною. Саме до таких методів відносять біологічні методи, які базуються на застосуванні паразитуючих та хижих організмів, таких, як трихограми або зеленоочки та інших. Науковці з НААН та НАН України останніми роками все більше вивчають і частково впроваджують у виробництво біологічні препарати [226]. Проте вітчизняний і світовий досвіди стверджують, що використання окремих заходів у біологічному землеробстві не можуть повністю забезпечити бажаний ефект. Тому їх потрібно суміщати з рештою заходів, які присутні в системі землеробства, через те, що всі вони тісно взаємопов'язані і перебувають у постійному зв'язку.

5.2.2 Застосування біодобрих у сучасних агротехнологіях

Зростання потреб у рослинництві та виробництві продуктів для харчування величезного населення екологічно чистим та економічно ефективним способом призвели до живого інтересу та вимоги до використання біодобрих не тільки для підвищення продуктивності, але й для збереження якості ґрунту та здоров'я довкілля, а також живих істот [228].

Рослинам, як і організму людини, необхідні біологічно активні речовини – гормони, вітаміни, амінокислоти тощо. Саме біологічно активні речовини, цукри та мінеральні речовини у необхідній кількості забезпечують безперебійну роботу рослинного організму. Вчасне постачання цих необхідних рослині речовин забезпечують ендofітні та ризосферні мікроорганізми. Окрім живих бактерій та мікроскопічних грибів (мікроміцетів), до складу біологічних препаратів можуть також входити і дуже необхідні рослинам природні біологічно активні речовини, які виробляють мікроби.

При внесенні біодобрих в ґрунт, вони колонізуються в ризосфері або всередині рослин, на поверхні проростків або насіння або в ґрунті та сприяють зростанню, прискорюючи доступність основних поживних речовин для рослини [229, 230]. Ці біологічні агенти також покращують фізичні, хімічні та біологічні

властивості ґрунту, а також забезпечують доступність поживних речовин для рослин [231].

Стан якості ґрунту, здоров'я рослин та вмісту поживних речовин багато в чому залежить від діяльності або взаємодії мікробних угруповань у ґрунтовій системі, особливо навколо ділянок ризосфери [232]. Ці бактерії активно сприяють поглинанню, розчиненню, мобілізації та мінералізації поживних речовин, що допомагає стимулювати зростання рослин та пригнічувати хвороби [233-235].

Діяльність зі стимулювання росту рослин, розчинення поживних речовин (N, P, K, Zn та S), виробництво сидерофорів, передача сигналу в рослинах та боротьба зі шкідниками є найбільш поширеними процесами, керованими мікробними співтовариствами, присутніми у ґрунті [229, 233, 236].

Ці процеси відповідають за посилення зростання та врожайності сільськогосподарських культур. Залежно від цих якостей мікробні біодобрива використовують для підвищення врожайності різних економічно важливих основних продовольчих культур, таких, як пшениця, рис, ячмінь, кукурудза, картопля [237]. Крім того, застосування добрив або біодобрив з контрольованим або повільним вивільненням перешкоджає збільшенню викидів N_2O , які зрештою сприяють забрудненню повітря та глобальному потеплінню [238].

Виробництво недорогих і ефективних біодобрив включає кілька етапів, починаючи з вибору відповідного носія, виділення та скринінгу мікробів для пошуку найбільш сильнодіючих, до проходження декількох тестів, перш ніж масштабувати його від стадії одного флакона до комерційної стадії [239, 240]. Також важливо знайти дешевшу сировину з високим вмістом поживних речовин, джерел вуглецю та азоту та використовувати її як субстрат або можливе рідке середовище для культивування мікроорганізмів. Деякі галузі змушені платити за звільнення від відходів або зазнають труднощів з їх переробкою. Таким чином, ці відходи та побічні продукти можна використовувати як можливі субстрати для розробки екологічно чистих біодобрив. Більше того, біодобрива можна адаптувати для забезпечення рослин азотом, фосфатом, цинком або іншими

поживними речовинами у різних типах ґрунтів з використанням певних типів бактерій порівняно з відсутністю використання добрив чи хімічними добривами [241].

Таким чином, застосування біодобрив дає численні переваги, оскільки покращує фізико-хімічні властивості ґрунту, перешкоджає забрудненню навколишнього середовища, підвищує продуктивність екологічно чистим, економічно ефективним та стійким способом [242].

5.2.3 Ризосфера та корисні для рослин мікроорганізми

У ґрунтах існує переважна кількість мікроскопічних форм життя, причому бактерії є найбільш поширеним типом (приблизно 95 %) [243]. Ризосфера є важливою «гарячою точкою» для цих мікроорганізмів, демонструючи широке бактеріальне розмаїття та активність, яка різко контрастує з тим, що виявляється в основній масі ґрунту, який на кілька порядків нижче [244, 245]. Ризосфера визначається як вузька область ґрунту, що прилягає до коріння рослин, на яку фізично та хімічно впливає активність та зростання коренів [246]. Це дуже складна мікросистема, в якій взаємодіє коріння рослин, ґрунт та мікроорганізми. За оцінками, ця багата поживними речовинами зона містить 10^{11} мікробних клітин на грам ґрунту, включаючи бактерії, гриби, найпростіших, нематод та безхребетних [247]. Це результат загальної взаємодії рослини та мікроорганізмів, а також ряду факторів, таких як рН ґрунту, температура, вологість, неорганічні поживні речовини та кореневі виділення [248]. Останнє має особливе значення, оскільки велика різноманітність корневих ексудатів є постійним джерелом поживних речовин та енергії, які стимулюють мікробну активність, зростання та різноманітність [249].

Бактерії, асоційовані з рослинами, можна класифікувати як шкідливі, нейтральні або корисні залежно від їхнього впливу на рослини. Отже, безперервне виділення корневих ексудатів (відоме як ризовідкладення) служить механізмом, що потребує високих витрат вуглецю (C) та азоту (N), і є ключовим фактором, що визначає мікробні співтовариства. Тип і склад ризовідкладень можуть залучати корисні мікроорганізми та відштовхувати несприятливі.

Кореневі екsudати, виявлені в ризосфері різних видів рослин, містять, наприклад, амінокислоти, цукри, органічні кислоти, жирні кислоти, флавоноїди, фактори росту та ферменти [247]. На їх частку може припадати до третини вуглецю, що закріплюється рослиною [243]. Таким чином, рослини забезпечують вітаміни, гормони, токсини та сполуки-антагоністи, які сприяють росту корисних для рослин видів бактерій [250]. З іншого боку, бактерії можуть сприяти зростанню та розвитку рослин, поставляючи доступні для рослин поживні речовини, послаблюючи біотичний та абіотичний стрес та захищаючи рослини від патогенів [247]. Бактерії відіграють життєво важливу роль у поглинанні та транспортуванні поживних речовин рослинами, керуючи кругообігом важливих поживних речовин. Вони впливають на структуру коренів та метаболізують кореневі виділення, які реабсорбуються рослинами [246].

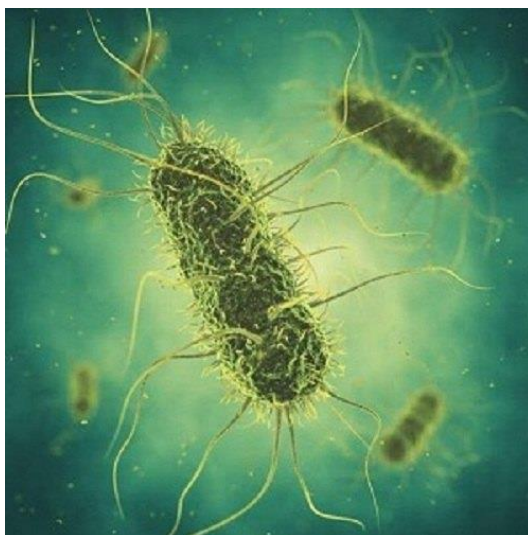
5.2.4 Бактерії, що стимулюють ріст рослин

Ще у 1978 році Клоппер і Шрот [251] дали визначення «ризобактерії» тим ґрунтовим бактеріям, які колонізувалися в коренях рослин та сприяли зростанню та розвитку рослин, інгібуючи хвороби рослин. Пізніше, в 1980 Клоппер і Шрот [252] використовували для позначення мікробів термін «ризобактерії, що сприяють росту рослин» (від англійської PGPR – Plant Growth Promoting Rhizobacteria). В даний час концепція ризобактерій, що сприяють росту рослин обмежується бактеріальними штамами, які відповідають як мінімум двом із трьох критеріїв, а саме агресивної колонізації, стимулюванню росту рослин та біологічному контролю. Залежно від існування та їх зв'язку з рослинами ризобактерії, що сприяють росту рослин можуть бути ризосферними або ендofітними. Ризосферні бактерії колонізують область поверхні кореня або поверхневі міжклітинні простори коріння рослин (малюнок 3), тоді як ентофітні бактерії колонізуються в апопластах всередині рослин [253].

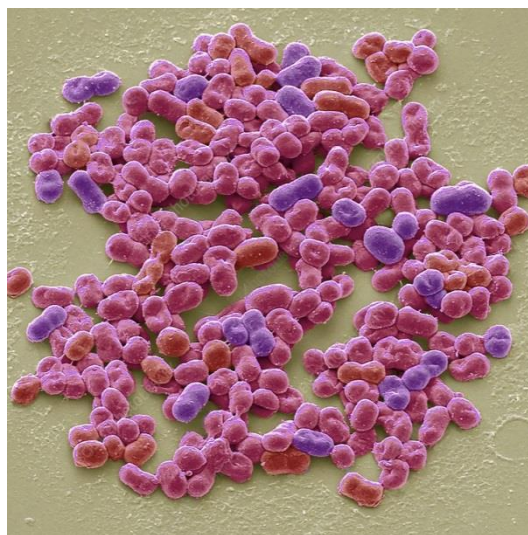


Малюнок 3. Зовнішній вигляд ризосферних бактерій

Ризобактерії, що стимулюють ріст рослин містять азотфіксуючі та симбіотичні бактерії, наприклад, різні види *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Azobacter*, *Serratia*, *Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clostridium* [232] (малюнок 4). Ці бактерії фіксують атмосферний азот в органічних формах та роблять його доступним для рослин (малюнок 4). Було визначено, що один грам ризосферного ґрунту вміщує в собі від 10^7 до 10^9 колоній-утворюючих одиниць (КУО), а щільність популяції бактерій, яка міститься в одному грамі ризоплану, може становити від 10^5 до 10^7 колоній-утворюючих одиниць.



Azospirillum



Azotobacter



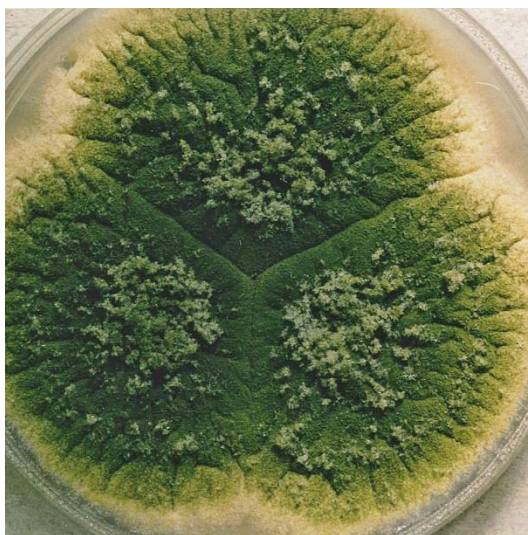
Pseudomonas



Rhizobium

Малюнок 4. Ризобактерії вигляд під мікроскопом

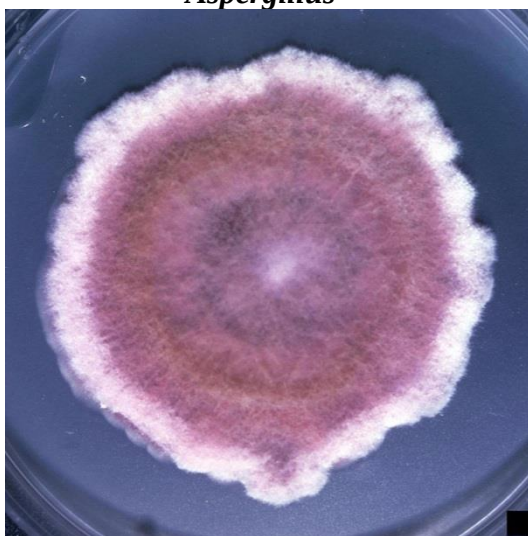
Деякі гриби також сприяють росту рослин (від англійської PGPF – Plant Growth Promoting Fungi). До них відносяться різні види грибів, такі як *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Trichoderma* та інші (малюнок 5). Ці гриби укладають симбіотичні відносини з коренями рослин у формі мікоризи та сприяють поглинанню та засвоєнню необхідних поживних важкодоступних речовин з гумусу, активізують діяльність ферментів рослин, своїми ферментами впливають на вуглеводний обмін, фіксують вільний азот та за допомогою сполук передають його рослинам разом з речовинами, що сприяють росту та надають рослинам збуджуючий вплив на їх ріст та розвиток [241].



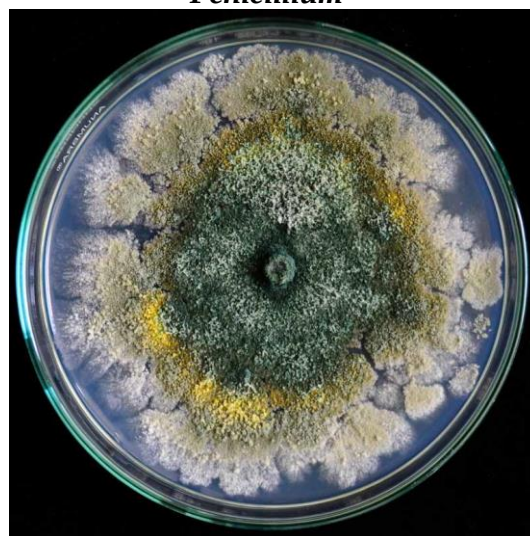
Aspergillus



Penicillium



Fusarium



Trichoderma

Малюнок 5. Види грибів що сприяють росту рослин

Ціанобактерії – це такий тип бактерій, які одержують необхідну енергію для життєдіяльності через фотосинтез. Їх більш застаріла назва, «синьо-зелені водорості», в основному спиралась на зовнішній вигляд та екологічну нішу ціанобактерій, але на сьогоднішній день термін «водорості», як правило, обмежують еукаріотичними представниками групи.

Ціанобактерії включають різні види: *Oscillatoria*, *Nostoc sp.*, *Anabaena*, *Tolypothrix* та інші (малюнок 6). Вони допомагають у фіксації азоту, що забезпечує збагачення ґрунту поживними речовинами. Крім ціанобактерій, як можливі біодобрива також використовувалися червоні і бурі водорості [229].



Anabaena



Nostoc sp.



Oscillatoria



Tolypothrix

Малюнок 6. Ціанобактерії вигляд під мікроскопом

Вони можуть збільшувати пористість ґрунту за рахунок своєї ниткоподібної структури та утворення речовин, що склеюють, секреції фітогормонів (ауксину, гібереліну), вітамінів та амінокислот [251]. Крім того, вони збільшують вміст поживних речовин у ґрунті за рахунок їх загибелі та розкладання, а також запобігають проникненню бур'янів та хвороботворних мікроорганізмів. Всі ці заходи допомагають покращити зростання та розвиток рослин і, зрештою, продуктивність [229].

Ризобактерії, що стимулюють ріст рослин (PGPR), та гриби, що стимулюють ріст рослин (PGPF), є важливою частиною біодобрив. Ці два види бактерій мають широкий спектр застосування в галузі сільського господарства,

але основна мета їх використання це підвищення продуктивності за рахунок стимулювання росту рослин та пригнічення патогенів. Таким чином, основні сфери застосування цих двох біодобрих це стимулятор росту та біологічний контроль.

Основною метою застосування PGPR і PGPF у сільському господарстві є підсилення росту та розвитку рослин, які зрештою мають вищу продуктивність, не завдаючи при цьому жодної шкоди екології [254, 255]. Таким чином, ці два основні компоненти біодобрих повинні діяти як стимулятори росту. Основними механізмами, що беруть участь у стимулюванні росту рослин, є вироблення фітогормонів, таких як β -індолилоцтова кислота, абсцизова кислота, цитокінін та етилен, які допомагають у розподілі клітин, подовженні та розширенні клітин, появі проростків, розвитку квітів та фруктів, соматичному ембріогенезі. З іншого боку, ці мікроби беруть участь у розчиненні фосфатів, фіксації азоту, виробництві сидерофорів, HCN, аміаку, вітамінів, таких як ніацин, тіамін, рибофлавін, а також допомагають у рості та розвитку рослин [229].

Було виявлено, що група видів PGPR таких, як: *Klebsiella sp.*, *Klebsiella pneumonia*, *Bacillus spumilus*, *Acinetobacter sp.* та *B. subtilis* збільшили продуктивність кукурудзи за рахунок різних механізмів, включаючи посилену фіксацію азоту, розчинення фосфатів та виробництво β -індолилоцтової кислоти. Також відомо, що деякі біодобрива виділяють сполуки, такі як δ -амінолевулінова кислота, яка допомагає знизити екологічний стрес і сприяє росту рослин рису [256]. Було виявлено, що використання деяких ризосферно-компетентних штамів *Trichoderma*, як біодобрих збільшилося через їх позитивний вплив на стимуляцію росту рослин і поглинання поживних речовин, збільшення швидкості проростання насіння та стимуляція захисту рослин від біотичних та абіотичних стресів [242]. Аналогічним чином, попередні дослідження різних дослідників показали, що PGPR і PGPF потенційно діють як стимулятор росту та успішно підвищують продуктивність або врожайність культур, (таблиці 1, 2) [257, 258, 259, 260, 261].

Таблиця 1. Вплив PGPR на параметри росту культур

PGPR	Культурні рослини	Вплив
<i>Bacillus amylo liquefaciens</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , та <i>Glomus interraddices</i>	Томат	Покращення росту рослин, врожайності та поглинання поживних речовин
<i>Azospirillum Lipoferum</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> та <i>P. putida</i> .	Кукурудза	Збільшення кореневої біомаси, загальної біомаси та продуктивності
<i>Providencia sp.</i> , <i>Alcaligenes sp.</i> , <i>Anabaena oscillarioides</i> та <i>Anabaena torulosa</i> .	Пшениця	Поліпшення зростання та біомаса сільськогосподарських культур.
<i>Pseudomonas jessenii</i> та <i>Pseudomonas synxantha</i> .	Пшениця, рис	Збільшення врожайності зерна, концентрації сирого білка та мінеральних поживних речовин (P, K, Cu, Fe, Mn) у зернах пшениці і рису, покращення якості ґрунту.
<i>Bacillus sp.</i> , <i>Providencia sp.</i> та <i>Brevundimonas diminuta</i>	Пшениця	Покращені параметри росту та продуктивність
<i>Bacillus Polymyx</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> та <i>Azospirillum barasileense</i> .	Пшениця	Поліпшення всіх параметрів росту з більшою врожайністю пшениці.
<i>Rizobium sp.</i> та <i>Pseudomonas sp.</i>	Квасоля	Поліпшення параметрів росту рослин, загальної маси зерна та врожайності, вмісту проліну та співвідношення K^+/Na^+ у польових умовах, схильних до засолення.
<i>Anabaena torulosa</i> , <i>Azotobacter sp.</i> , <i>Mesorhizobium sp.</i> , <i>Serratia sp.</i> та <i>Pseudomonas sp.</i>	Пшениця	Поліпшення біологічних та хімічних властивостей ґрунту.
<i>Bacillus megaterium</i> , <i>Arthrobacterchromophenolicus</i> та <i>Enterobacter sp.</i>	Пшениця	Були збільшені висота рослин, врожайність зерна, вихід соломи, натурна маса та вміст мікроелементів.
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas putida</i> та <i>Pseudomonas fluorescens</i> .	Рис	Збільшення врожайності зерна, росту рослин, вмісту поживних речовин у зерні та соломі рису.
<i>Bacillus amylo liquefaciens</i> , <i>Bradyrhizobium japonicum</i> .	Соя	Підвищена колонізація коренів рослин та кількість бульбочок
<i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Bacillus amylo liquefaciens</i> , <i>Serratia marcescens</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Імбир	Вища схожість, менша захворюваність і більший врожай кореневища.
<i>Ризобиевые</i>	Рапс	Поліпшення схожості насіння та росту рослин.
<i>Sphingomonas sp.</i> , <i>Bacillus sp.</i>	Томат	Збільшення біомаси пагонів та коренів, а також вмісту хлорофілу.
<i>Azospirillum sp.</i> , <i>Azoarcus spp.</i> та <i>Azorhizobium sp.</i>	Пшениця	Поліпшення росту коренів, стійкість до стресів навколишнього середовища та зниження втрат азоту.

Таблиця 2. Вплив PGPF на параметри росту культур

PGPF	Культурні рослини	Вплив
<i>Trichoderma</i> sp.	Квасоля	Поліпшення росту розсади квасолі
<i>Trichoderma</i> sp.	Квасоля, нут	Поліпшені компоненти врожайності та зростання всіх рослин.
<i>Trichoderma harzianum</i>	Томат	Поліпшення виходу за рахунок збільшення загального вмісту сухих розчинних речовин, цукру, аскорбінової кислоти, b-каротину, лікопіну, вмісту P і Mn.
<i>Trichoderma harzianum</i>	Пшениця	Значне збільшення врожайності пшениці
<i>Trichoderma</i> sp .	Огірок	Збільшення схожості насіння та покращення параметрів зростання.
<i>Trichoderma viride</i>	Капуста та буряк	Прискорене зростання
<i>Trichoderma asperellum</i>	Нут	Поліпшене проростання насіння та зростання рослин для обох рослин.
<i>Trichoderma asperellum</i>	Меліса лікарська	Стимулювання зростання із збільшенням сухої маси трави
<i>Pleurotustuber-regium</i> , <i>Lentinus squarrosulus</i> та <i>Ganoderma</i> sp.	Пшениця і томат	Збільшення параметрів зростання за рахунок активності хітінази та ефіру, вироблення сидерофорів та розчинення фосфатів.

5.2.5 Металофіти та фіторе mediaція металозабруднених ґрунтів

Забруднення важкими металами є однією з найсерйозніших екологічних небезпек нашого часу. Зростаюча урбанізація та індустріалізація призвели до видобутку руди, що постійно зростає, і переробки видобутих елементів для численних потреб [262].

Забруднення ґрунту металами в основному пов'язане з сільським господарством, гірничо-видобувною промисловістю. Основними антропогенними джерелами забруднення є використання агрохімікатів, таких як добрива, гербіциди і пестициди, водостік з відходів гірничої промисловості, каналізаційних шламів, промислової та побутової стічної води, а також зрошення сільськогосподарських угідь забрудненою водою [263]. Також значним шляхом забруднення ґрунту металами є атмосферне осідання металів і металоїдів з аерозолів, що виділяються під час гірничої та металургійної діяльності,

виробництва цементу, переробки електронних відходів, електростанцій на паливних горючих, спалювання відходів та використання транспорту [264]. У земних екосистемах ґрунт – це основне місце для зберігання металів, що потрапляють в навколишнє середовище, а кількість територій, що забруднені металами по всьому світу дуже велика. На відміну від органічних речовин, метали не підлягають розкладанню і, якщо їх не видаляють або не мобілізують, вони залишатимуться в ґрунті після їхнього введення. Деякі з найпоширеніших металів і металоїдів в забруднених областях – це миш'як (As), кадмій (Cd), хром (Cr), мідь (Cu), свинець (Pb), ртуть (Hg), нікель (Ni) та цинк (Zn) [264]. Ці елементи відомі тим, що потрапляють в ланцюг харчування, накопичуються в тканинах живих організмів (біоаккумуляція) і збільшують свою концентрацію, переходячи від нижнього до верхнього трофічного рівня (біомагніфікація). Метали можуть мати небезпечні токсичні ефекти навіть при дуже низьких концентраціях, а отже, їх накопичення в навколишньому середовищі становить серйозний ризик для рослин, тварин і людини. Багато ґрунтів забруднених металами повністю позбавлені рослин, що в кінцевому підсумку призводить до серйозної ерозії ґрунту та забруднення водних резервуарів. Забруднення металами також шкідливе для ґрунтових мікроорганізмів та змінює природні мікробні спільноти, зменшуючи їх кількість і активність [255]. У людини гострий і хронічний вплив металів та металоїдів може призвести до різноманітних шкідливих ефектів на здоров'я, таких як шкірні захворювання, серцево-судинні захворювання, порушення поведінки та розлади уваги, порушення нервової та імунної систем, розлади шлунково-кишкової та ниркової функції, рак та інші ускладнення [256]. Тому вирішення питання про реабілітацію забруднених металами ґрунтів вимагає належної уваги для мінімізації їхнього руйнівного впливу на екосистеми і, в кінцевому підсумку, на здоров'я людини.

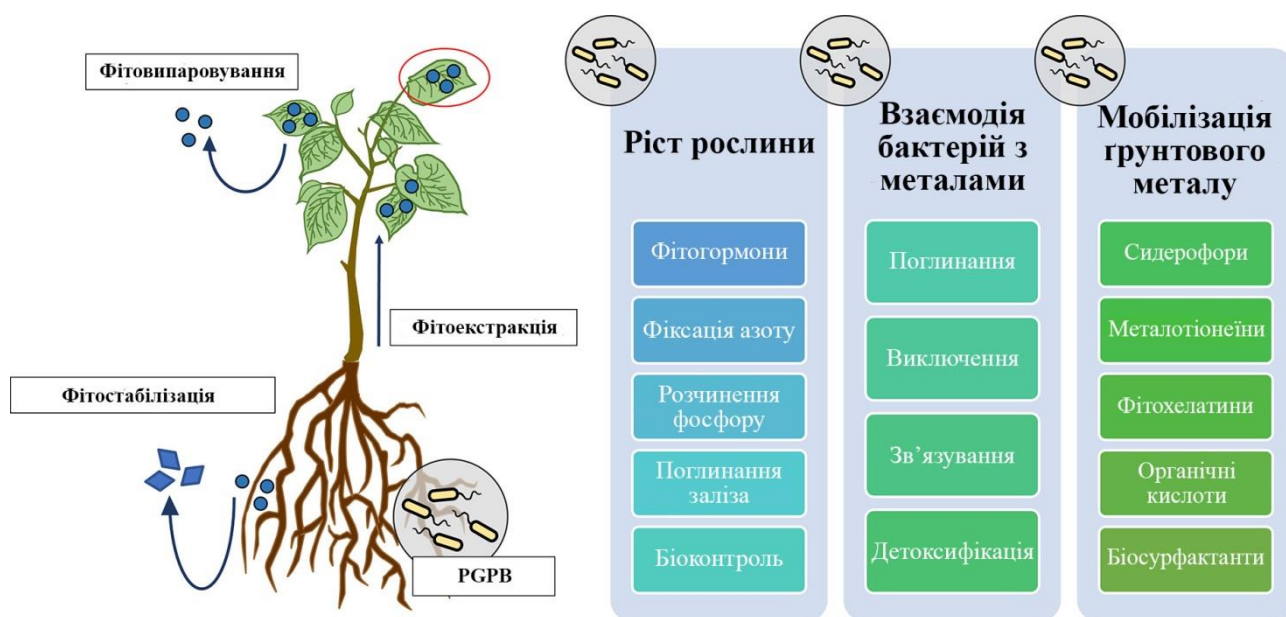
Отже, концентрації металів або металоїдів у ґрунтах зростаються із року в рік, представляючи великий ризик для довкілля та здоров'я людини через високу токсичність деяких з цих елементів [265]. Для вирішення проблеми забруднення ґрунту важкими металами можуть бути застосовані фізичні та хімічні методи

відновлення. Однак ці стратегії є дорогими, вимагають інтенсивної роботи, змінюють властивості ґрунту та порушують природний мікробіом ґрунту. Крім того, хімічне очищення може також викликати інші шкідливі побічні ефекти. Більш стійким та екологічним підходом до рекультивації ґрунтів, забруднених важкими металами, є фіторе mediaція. Ця стратегія полягає у використанні рослин та пов'язаних з ними ґрунтових мікробів для зниження токсичної дії або концентрації забруднюючих речовин у навколишньому середовищі. На відміну від традиційних методів, фіторе mediaція визнана економічно ефективною, неінвазивною та екологічно безпечною. Більше того, оскільки технологія рослинного походження, вона також естетично приємна, працює на сонячній енергії та підходить для великомасштабного польового застосування [266]. Незважаючи на численні прориви, досягнуті за останні три десятиліття, ця фітотехнологія постійно розвивається. Ефективна фіторе mediaція забруднених важкими металами ґрунтів передбачає використання методів керування ґрунтом та рослинами, таких як застосування органічних добрив, хелатуючих агентів та мікробних інокулянтів. Останнє є відносно новою, цікавою та багатообіцяючою концепцією, оскільки ґрунтові мікроорганізми є важливим компонентом екосистеми та відіграють вирішальну роль у підтримці родючості ґрунту. Стійкі до металів штами, що відібрані рослинами, мають вирішальне значення для детоксикації металів у металоносних ґрунтах, оскільки вони допомагають рослинам витримувати токсичність металів і покращувати поглинання металів. Ці мікроорганізми набули ряду метаболічних здібностей, які дозволяють їм процвітати при підвищених концентраціях металів у ґрунті, і відомо, що вони накопичують, трансформують та детоксикують метали. Враховуючи першорядну роль бактерій у забруднених металами ґрунтах, розуміння їх функцій та розробка стратегій підтримки здорового мікробіома ґрунту мають вирішальне значення для покращення та підтримки систем фіторе mediaції, а отже, мікроорганізми мають життєво важливе значення для відновлення функцій та біорізноманіття екосистем [267].

Вживання рослин у сильно забруднених металами ґрунтах часто обмежується обраною групою рослин, відомих як металофіти, і загальне здоров'я рослин виявляється під загрозою. У цьому контексті рослинно-мікробні асоціації, що займаються управлінням стресом від металів, є ще одним цінним виміром стандартної фіторе mediaції.

Створення рослинності на безплідних, забруднених металами ділянках запобігає ерозії та вилугування металів. Рослини зазвичай справляються із забруднювачами, не торкаючись верхнього шару ґрунту, тим самим зберігаючи корисність ґрунту. Вони також покращують біорізноманіття, родючість ґрунту за рахунок надходження органічних речовин та сприяють фіксації CO₂ в атмосфері. До металофітів відносяться рослини, спеціально пристосовані до ґрунтів, багатих на метали. Ці рослини розвинули біологічні механізми завдяки природному відбору протягом тривалих термінів еволюції, піддаючись впливу багатих металами середовищ, що дозволяє їм переносити та процвітати в умовах, токсичних для звичайних рослин. Однак слід зазначити, що ці механізми можуть дати збій, якщо концентрації металів у ґрунті перевищують певні межі. Металофіти можна класифікувати як облігативні для яких наявність металів в ґрунті обов'язкова або факультативні – вид який не обмежений тільки ґрунтами багатими на метали. Більше того, металофіти також включають рідкісну та чудову групу рослин, відому як гіперакумулятори через їхню здатність накопичувати у своїх пагонах велику кількість металів [268].

Фіторе mediaцію можна розділити на три різні підгрупи залежно від типу забруднення та складу. У контексті забруднення ґрунту металами особливо ефективні дві стратегії: фітостабілізація та фітоекстракція (малюнок 7) [269].



Малюнок 7. Роль бактерій у стимуляції росту рослин, утворенні металів у ґрунті та фітореMediaції

Фітостабілізація зосереджена на зниженні рухливості та біодоступності металів, обмеженні їх вилуговування та попадання в ґрунтові води та харчовий ланцюг відповідно. Тим не менш, це є стратегією управління, а не постійним рішенням, оскільки метали лалишаються у ґрунті, а отже, регулярний моніторинг має вирішальне значення при використанні цього. Фітоекстракція полягає в поглинанні металів з ґрунтів та їх переміщенні та накопиченні в пагонах рослин з подальшим збиранням та безпечною утилізацією біомаси. Це краща стратегія зниження концентрації металів у ґрунті без істотного впливу на властивості ґрунту. Однак слід зазначити, що залежно від концентрації металів та ефективності процесу фітоекстракція може зайняти тривалий період часу для досягнення цільової мети відновлення. Крім того, окремі гіперакумулятори також можуть бути використані як культури з яких можна вилучити цінні елементів, такі як золото, нікель і реній – процес, який отримав назву фітомайнінгу або агромайнінгу. Варто зазначити, що фітоекстракційний потенціал рослини багато в чому визначається концентрацією металів у пагонах та виходом біомаси [270]. В результаті двома основними підходами до фітоекстракції металів є використання гіперакумуляторів та/або металофітів, що

демонструють високу продукцію біомаси та відповідне поглинання металів. Отже, ефективність фітоекстракції можна підвищити за рахунок збільшення як росту рослин, так і біодоступності металів у ґрунті. Третя підгрупа фіторемедіації, відома як фітовипаровування, також може використовуватися для боротьби з металевими забруднювачами, такими як As і Hg. У цьому процесі рослина поглинає метал і перетворює його на летючу форму для викиду в атмосферу через продиhi. Однак слід зазначити, що оскільки забруднювач просто переміщається з ґрунту в атмосферу, він, швидше за все, буде перевідкладений у вихідному середовищі. Крім того, у програмах фіторемедіації необхідно враховувати такі фактори, як швидкість росту рослин, глибина та розподіл кореневої системи, толерантність до токсичності металів, характеристики ґрунту, стійкість до патогенів та шкідників, а також адаптація до екологічних та кліматичних умов. Таким чином, розуміння цих рослинно-мікробних асоціацій при фіторемедіації має вирішальне значення для рекультивації ґрунтів, забруднених металами [233].

5.2.6 Механізми стимулювання росту рослин мікробами

Мікроорганізми, що стимулюють ріст рослин виявляють різні механізми, які прямо чи опосередковано допомагають стимулювати або поліпшувати ріст та розвиток сільськогосподарських рослин і у кінцевому підсумку призводять до збільшення врожайності сільськогосподарських культур. Прямі механізми – це ті, які беруть участь у синтезі речовин мікробами або допомагають засвоювати поживні речовини з довкілля [243]. До них відносяться розчинення фосфатів, азотфіксація, виробництво сидерофору, синильної кислоти, аміаку, вітамінів і фітогормонів (таких як ауксин, цитокінін та гібереліни) [228, 232].

Мікроорганізми, що фіксують азот, постійно перетворюють атмосферний N_2 на доступні для рослин форми, такі як аміак і нітрати завдяки дії складного ферменту нітрогенази. Макроелемент фосфор часто знаходиться у нерозчинній формі, недоступній для рослин [243]. Фосфатрозчинні бактерії важливі для збільшення рівнів доступного для рослин фосфору. Цей процес може відбуватися завдяки виділенню ферментів, таких, як фосфатази, фітази, ліази та

інших, та низькомолекулярних органічних кислот (оцтова, яблучна, сукцинінова і лимонна кислоти). Деякі мікроорганізми також можуть перетворювати Fe^{3+} в Fe^{2+} , які стають легкодоступним для рослин і відіграють центральну роль в різних метаболічних функціях. Ця трансформація здійснюється за допомогою сидерофорів, білків, які синтезуються бактеріями і можуть зв'язуватися з широким спектром металів, тим самим підвищуючи їх доступність для рослинного поглинання [271].

Крім того, бактерії збагачують рослини фітогормонами, такими як оксини, цитокіни та гіббереліни, які відповідають за підвищення росту рослин і можуть, також, запобігати фітотоксичності металів. Ці фітогормони, в залежності від виду, можуть відповідати за стимулювання проростання насіння, ріст коренів, ріст пагонів і розширення листя завдяки подовженню, поділу і диференціації клітин, серед інших корисних ефектів. Найважливіший ауксин, який синтезується бактеріями це β -індолилоцтова кислота (IAA). Також відомо, що мікроорганізми виробляють фермент 1-аміногідроксипропан-1-карбоксилат (ACC) деаміназу, який регулює рівні етилену в рослинах. У негативних умовах рослини виробляють шкідливі кількості етилену, важливого стресового гормону, який в високих концентраціях стає шкідливим. Етилен вважається багатофункціональним рослинним гормоном, який регулює ріст і старіння). Таким чином, ACC деаміназа важлива для нормалізації рівнів цього фітогормону [272].

Непрямі механізми – це ті, які не беруть безпосередньо участі в поліпшенні росту, але синтезують різні неорганічні та органічні сполуки за допомогою різних механізмів. Це відбувається під час вироблення різноманітних антибіотичних сполук, відомих, як алелохімікати, які забезпечують захист від патогенів. Алелохімікати включають антибіотики, синильну кислоту (HCN), літичні ферменти та сидерофори. Антибіотики, які синтезуються RGPB, такі як пірролінтрин, феназини, флороглюциноли, циклічні ліпopeптиди та ліпopeптиди, відіграють важливу роль у запобіганні росту інших бактерій і грибів. Деякі RGPB також виявляють ціаногенну активність (виділення HCN),

яка, крім того, часто використовується для біозахисту, підвищуючи дію бактеріальних антибіотиків. Відомо, що літичні ферменти відлякують поширення грибкових патогенів шляхом гідролізу складових клітинної стінки [243]. Окрім біозахисту, ці ферменти також відіграють роль у переробці поживних речовин через розкладання органічних решток, що підвищує доступність поживних речовин. Сидерофори сприяють біозахисту, запобігаючи патогенам отримувати залізо, обмежуючи їх розмноження.

Бактерії також сприяють процесу, відомому як індукований системний захист, який відповідає за більш ефективну і швидку реакцію проти великої кількості патогенів. Крім того, деякі RGPB здійснюють біозахист, просто конкуруючи з патогенами у здобутті ресурсів і колонізації ризосфери [273]. На рисунку 8 схематично зображено роль ризобактерій у стимуляції розвитку рослин.



Рисунок 8. Механізми поліпшення росту сільськогосподарських культур

5.2.6.1 Біологічна азотфіксація

Азот (N) є сьомим за поширеністю елементом на Землі і стає обмежуючим фактором через його втрати з сільськогосподарських полів у вигляді стоку та змиття [274]. N є компонентом хлорофілу та білка і, отже, необхідний для фотосинтезу, а також вегетативного, репродуктивного росту та розвитку рослин [236]. Цей елемент зазвичай представлений у нерозчинних неорганічних формах. Мікроби, присутні в біодобривах, переводять газоподібний азот у розчинні форми і роблять його доступним для рослин в органічних формах, особливо у формі нітратів (NO_3^-) та амонію (NH_4^+). Таке перетворення атмосферного азоту на амоній і нітрати отримало назву «азотфіксація». Різні види *Azotobacter sp.*, *Rhizobium sp.*, *Azospirillum sp.*, *Acetobacter sp.*, *Herbaspirillum*, *Anabaena*, *Nostoc*, *Plectonema*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Trichoderma sp* та інші – мікроби, що широко використовуються в біодобривах, відомі своєю здатністю фіксувати атмосферний азот і брати участь у підтримці циклу азоту на Землі [233]. Фіксація атмосферного азоту може бути симбіотичною або не симбіотичною залежно від штаму бактерій. Сучасні дослідження демонструють інокуляцію насіння бактеріями *Herbaspirillum seropedicae* і визначають, що це підвищує концентрацію азоту в тканині листя кукурудзи за рахунок збільшення біологічної фіксації азоту цими діазототрофними бактеріями. Список різних біодобрив, що містять різні види PGPR, наведено у таблиці 3 [275].

Таблиця 3. Вплив фітогормонів на стимуляцію росту рослин.

Мікроби	Фітогормони	Рослина	Реакція рослин
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	1-аміноциклопропан-1-карбоксилат (АСС) дезаміназа	Кукурудза	Поліпшення росту рослин та фіксації N
<i>Streptomyces sp.</i>	Виробництво β -індолилцетової кислоти та розчинення неорганічних фосфатів	Соя	Зростання рослин покращилося на 77%

Продовження таблиці 3

<i>Pseudomonas</i> sp.	Виробництво β - індолилоцтової кислоти та розчинення фосфатів	Соняшник	Поліпшене зростання рослин
<i>Pseudomonas</i> <i>putida</i>	Виробництво β - індолилоцтової кислоти	Квасоля	Поліпшені параметри зростання
<i>Bacillus</i> sp.	АСС дезаміназа та хелатування	Пшениця	Суха маса кореня збільшена
<i>Bacillus</i> <i>mucilaginosus</i>	Створення білків та полісахаридів	Часник	Поліпшені параметри зростання
<i>Bacillus</i> <i>mucilaginosus</i>	α -кетоглюконова кислота	Томат	Поліпшення засвоєння К та Р та біомаси на 125 %.
<i>Pseudomonas</i> <i>aeruginosa</i>	Вироблення саліцилової кислоти	Соняшник	Поліпшене зростання

Діазотрофи, що сприяють росту рослин і здатні зв'язуватися з корінням рослин, широко використовуються як інокулянти для підвищення врожайності сільськогосподарських культур та зменшення використання хімічного азотного добрива. Науковцями були поставлені дослідження в яких оцінювалося, як ендоефітний *Pseudomonas stutzeri*, яким було інокульовано насіння кукурудзи, покращував зростання рослин та вміст азоту в рослинах. Ефекти інокуляції та різних водних режимів також оцінювалися для ризосферних і поверхневих ґрунтових спільнот кукурудзи. Результати підтвердили, що кукурудза, інокульована *Pseudomonas stutzeri*, зростала краще і накопичувала більше азоту через 60 днів, ніж рослини, інокульовані хімічними препаратами. Позитивний вплив інокулянта на рослину коливається в діапазоні від 0,3 до 0,82 г азоту на рослину, залежно від водних умов. Інокуляція *Pseudomonas stutzeri* суттєво змінила склад діазотрофної спільноти, внаслідок чого *Pseudomonas stutzeri* став домінуючим у ризосфері, а також збільшила популяцію аборигенних діазотрофів та окислювачів аміаку та транскриптів функціональних генів. Аналіз надмірності показав, що ґрунтовий відсік та обробка інокуляцією *Pseudomonas stutzeri* були основними факторами, що впливають на розподіл діазотрофної спільноти [275].

5.2.6.2 Розчинення фосфору

Фосфор (P) є другим найбільш важливим макроелементом після азоту і іноді стає обмежуючим фактором через недоступність та втрат зі стоками. P відіграє значну роль у зростанні та розвитку рослин, оскільки він необхідний для фотосинтезу, дихання, зберігання та передачі енергії у живих рослинних клітинах [228]. Виявлено, що у багатьох ґрунтах спостерігається дефіцит фосфору, хоча вони можуть мати велику кількість загального фосфору як резерву. Це відбувається через недоступність розчинної форми P, оскільки рослини можуть поглинати P в органічних розчинних формах. Біодобрива покликані перетворювати неорганічні форми фосфору в органічні шляхом підкислення, секреції органічних кислот або протонів, хелатоутворення та обмінних реакцій, що робить його доступним для рослин для його легкого засвоєння та посилення росту і розвитку рослин. [233]. Визначено, що різні види *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Burkholderia*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Microbacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* та інші. значно розчиняють фосфор [253]. В деяких роботах науковців наголошується, що застосування *Aspergillus awamori* значно покращило зростання сої, загальний вміст фосфору в ґрунті та біомасу рослин. Також зазначається [275], що застосування штаму *Azospirillum brasilense* та штаму *Herbaspirillum seropedicae* збільшувало розчинність фосфору та посилював зростання кукурудзи. Аналогічним чином, *Aspergillus niger* діє як гриб, що розчиняє фосфор, і посилює зростання рослин за рахунок збільшення вмісту доступного фосфору в ґрунті. *Acinetobacter sp.* та *Bacillus sp.* виявляють солестійкість і здатність розчиняти фосфати, а також посилювали зростання за рахунок вищого індексу енергії, збільшення відсотка схожості, біомаси рослин, вмісту фенолів та антиоксидантної активності порівняно з не інокульованими рослинами [276].

5.2.6.3 Виробництво сидерофорів

Це низькомолекулярні сполуки, які виробляються в умовах обмеження заліза і мають здатність хелатувати іон тривалентного заліза (Fe^{3+}) і транспортувати його в мікробні клітини [230]. Термін «сидерофор» був уперше

придуманий у 1973 році і визначений як молекули з низькою молекулярною масою, які мають тенденцію пов'язувати тривалентне залізо з надзвичайно високою спорідненістю. Сидерофори класифікуються за наявністю лігандів, що хелатують тривалентне залізо. До них відносяться катехолати, гідроксамати та карбоксилати [277]. Залізо є важливим мікроелементом і потрібне рослинам як кофактор білків для їх різної фізико-хімічної та метаболічної активності включаючи фотосинтез та дихання [233]. Хоча вони є у ґрунті у великих кількостях, оскільки це четвертий за поширеністю елемент на Землі, вони зазвичай недоступні для поглинання рослинами або мікробами через їх нерозчинні складні форми [272]. Сидерофори, що виробляються біодобривами, роблять його доступним для рослин шляхом перетворення на розчинне і хелатуюче з доступного складного органічного або неорганічного заліза [233, 253]. Сидерофори також пригнічують шкідників і бур'яни, позбавляючи їх поживної речовини, що містить залізо, і, таким чином, допомагають поліпшити ріст і розвиток рослин і підвищити врожайність сільськогосподарських культур [274]. Хімічні структури сидерофорів утримують багаті електронами або атоми, такі як кисень або азот, які мають здатність зв'язуватися з катіонами металів. Проведені провідними дослідниками світу дослідження показали визначну роль різних штамів мікроорганізмів таких як наприклад *Stenotropomonas chelatiphaga*, що виробляють сидерофори, у стимулюванні зростання та активності біоконтролю.

5.2.6.4 Виробництво фітогормонів

Фітогормони – це речовини природного походження, які виробляються всередині рослин і регулюють зростання та розвиток рослин за допомогою різних фізіологічних та метаболічних дій, таких як поділ клітин, подовження стебла, гальмування, зростання коренів, активація розвитку бруньок та гілок, сприяння або затримка старіння листя, виробництво хлорофілу [233, с. 61]. Вони також діють як посередники для синхронізації та регулювання абіотичних стресових реакцій та взаємодій рослин та патогенів [278]. Вони в основному складаються з ауксину (β -індолилцтової кислоти), цитокініна, етилену,

гіберелінів і абсцизової кислоти, тоді як до цієї категорії також додані деякі нові фітогормони, наприклад брассино-стероиди, жасмонати і стріголактони, які повинні допомогти рослинам переносити абіотичний стрес [230, 278, 259]. β -індолилцтова кислота входить до складу ауксину і є основним попередником клітинного поділу та подовження, що впливає на зростання стебла. Аналогічно, цитокінін також активує поділ клітин та сприяє стимулюванню росту рослин, регулюючи біосинтез та біогенез хлоропластів [278]. Етилен – перший газоподібний фітогормон, який регулює зростання та старіння рослин, а також допомагає переносити стресові умови [230]. Однак надлишок етилену може вплинути на здоров'я рослин у вигляді скручування і вкорочування коренів. Дезаміназна активність рістрегулюючих мікробів допомагає рослині боротися з такими проблемами та стимулює зростання рослин у стресовому середовищі [233]. Крім того, абсцизова кислота покращує захисний механізм рослин і бореться з різними патогенами, регулює відкриття та закриття продихів і допомагає рослинам вижити в умовах біотичних та абіотичних стресів. Аналогічним чином, гібереліни також є важливими гормонами, що стимулюють зростання рослин, і беруть участь у процесах розвитку та фізіологічних процесах, таких як проростання насіння, поява сходів, індукція цвітіння та зростання плодів [279]. Мікроби, такі як *Pseudomonas*, *Rhizobacteria*, *Trichoderma*, *Azobacter*, *Bacillus* та інші, що присутні в різних біодобривах, виділяють ці фітогормони і допомагають у зростанні та розвитку рослин [253]. На додаток до цього, корисні рістрегулюючі бактерії є потенційними виробниками цих фітогормонів, посилюють індуковану системну стійкість (ISR) та системну набуту стійкість (SAR), які борються з патогенами та зміцнюють імунну систему рослин [232]. Різні дослідники повідомили про позитивну роль ріст регулюючих мікробів у стимулюванні росту рослин та стійкості до стресу за рахунок виробництва різних фітогормонів, наприклад різні штами *Azospirillum*, *Azobacter*, *Bacillus*, *Kluyvera*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobacteria* і *Rhizobium*, потенційно виробляють величезну кількість ауксину. Також виявлено, що штами *Bacillus licheniformis* і *Pseudomonas fluorescens*, виділені з

ризосфери винограду, глибоко синтезує абсцизову кислоту і знижує водний стрес у рослин. Крім того, ці мікроби також виробляють β -індолилоцтову кислоту та гіберелінові кислоти, які також сприяють стійкості рослин до умов водного стресу [280]. Секреція гіберелінової кислоти бактеріями *Pseudomonas putida* допомагає рослинам сої справлятися з сольовим стресом, а також посилює зростання рослини. Аналогічним чином, корисна роль різних мікробів за допомогою виробництва фітогормонів у рості рослин та управлінні стресом в екстремальних умовах довкілля представлена у роботах також тут описана здатність цих фітогормонів інгібувати інвазію різних патогенів, включаючи бактерії, віруси, гриби, нематоди тощо [281].

5.2.6.5 Виробництво антибіотиків та ферментів

Каталази, аскорбатпероксидази, пероксиредоксини, глутатіонпероксидази, глутатіон S-трансферази, аміноциклопропан-1-карбоксилат (АСС)-дезаміназа та інші є ферментами, що беруть активну участь у метаболічній та антагоністичній діяльності рослин та мікробів [253]. Біодобрива, що містять рістрегулюючі мікроби, виробляють ці ферменти та антитіла, які регулюють зростання та розвиток, а також пригнічують патогенну активність [230]. У біодобривах присутні різні мікроби, такі як *Pseudomonas* sp. *Bacillus* sp. *Streptomyces* sp. та інші, вони мають тенденцію виробляти 2,4-діацетилфлороглюцинол, β -1-3-глюканази, хітінази, антибіотики амфізин, феназин, ооміцин А, трополон, піолутеорин, тензин, пірролнітрин [253]. Ці речовини мають антибіотичні, антибактеріальні, протигрибкові, противірусні, протиглистові, протимікробні, антиоксидантні та протипухлинні властивості. Вони ефективно конкурують з патогенами, захищають рослини від їх шкідливого впливу та сприяють правильному зростанню та розвитку рослин. Так, наприклад, вироблення ферментів протеази та ліпази з різних видів ріст регулюючих мікробів, таких як *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Xanthomonas* та *Agrobacterium* sp., що виділяються з Валеріани лікарської.

5.2.6.6 Виробництво аміаку та синильної кислоти

Виробництво аміаку (NH_3) та синильної кислоти (HCN) також є одним із важливих факторів, що сприяють росту рослин, які допомагають інгібувати патогенні мікроорганізми [228, 230]. HCN є летючим вторинним метаболітом, що пригнічує розвиток патогенів та негативно впливає на їх зростання та розвиток. HCN допомагає хелатувати іони металів та розчиняти фосфати [233].

Виробництво NH_3 та HCN не залежить від роду або виду бактерії. Обидві ці сполуки сприяють постачанню азоту рослині і росту кореня та пагона, покращенню біомаси та, тим самим, підвищенню продуктивності кукурудзи. Синильна кислота, що вироблена такими бактеріями, як *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Bacillus*, *Alcaligenes* та *Aeromonas*, підвищує ефективність антигрибкової активності цих бактерій [233].

5.2.6.7 Розчинення цинку

Цинк (Zn) – це мікроелемент, необхідний рослинам для регуляції виробництва деяких білків, а також відіграє каталітичну і структурну роль в метаболізмі рослин у дуже низьких концентраціях (5-100 мг/кг) [282]. Він переважно споживається рослинами у вигляді двовалентного катіону Zn^{2+} , але у вапняних ґрунтах та ґрунтах з високим рН він споживається у вигляді одновалентного катіону ZnOH^+ [233]. Дослідженнями європейських науковців було доведено, що мікроби, присутні в біодобривах, розчиняють цинк, присутній у ґрунті, та активують його для різних метаболічних та катаболічних процесів. *Trichoderma sp.*, *Providencia sp.*, *Anabaena sp.*, *Calothrix sp.*, *Anabaena. sp.* та деякі інші бактерії значно розчиняють Zn і допомагають стимулювати зростання та підвищувати продуктивність різних рослин, включаючи пшеницю [282].

5.2.7 Роль біодобриг у біологічному контролі

Біодобрива складаються з живих мікроорганізмів та біорозкладних речовин, які широко використовуються для покращення якості ґрунту та допомагають запобігти появі хвороботворних мікроорганізмів, діючи як агент біологічного контролю [230]. Інвазія фітопатогенів, у тому числі різних бактерій, вірусів, нематод тощо, є основною причиною зниження продуктивності та якості

сільськогосподарських культур. Використання хімічних пестицидів для позбавлення від патогену не є розумним рішенням, оскільки вони не тільки забруднюють довкілля та харчовий ланцюжок, але і є дорогими [254]. Таким чином, використання біологічного контролю порівнюючи з ними є ефективним, економічно вигідним та екологічно чистим підходом. PGPR і PGPF виробляють різні органічні та неорганічні речовини, антитіла, які зменшують атаку патогенів і сприяють зростанню та розвитку рослин. Далі PGPR і PGPF виробляють кілька ферментів і антитіл, що гідролізують целюлозу, геміцелюлозу, хітин і білки, присутні в клітинах патогенів [255].

Виробництво ферментів хітиназ за допомогою PGPF сприяють лізису клітинних стінок гіф фунгальних патогенів та захищають рослини, тоді як естерази розщеплюють кутин і суберин в кутикулах рослин. [233]. Виробництво сидерофорів PGPRs і PGPFs створює конкуренцію за забору заліза між рослинами, мікробами і патогенами, що пригнічує рост патогенів. Крім того, вони також конкурують з патогенами за їхні потреби в харчах та просторі та пригнічують їхнє помноження в ризосфері. *Serratia plymuthica* C48, *Serratia marcescens*, *Paenibacillus* sp., *Streptomyces* sp. і *Pseudomonas stutzeri* виробляють фермент хітиназу, який розкладає міцелій грибкових патогенів [230]. β -1,3-глюканаза, вироблена *Streptomyces*, *Paenibacillus* і *Bacillus* sp., розкладає клітинну стінку грибків. Використання різних видів *Trichoderma* як антагоністів до різних патогенів зросло в останні кілька років. Згідно досліджень, *Trichoderma* sp. виробляє антигрибкові метаболіти і створює конкуренцію за простір та поживні речовини, що сприяє успішному пригніченню *T. asperellum* у боротьбі з чорною гниллю ананасів, викликаною грибком *Thielaviopsis paradoxa*. Крім того, інші біодобрива, які часто використовуються, містять різні види *Pseudomonas*, *Bacillus* та мікоризу, які мають здатність реалізовувати механізми ISR і SAR та детоксифікувати фітопатогени, що сприяє підвищенню захисту рослин від різних патогенів. Також PGPR і PGPF допомагають у виробленні фітогормонів, таких як β -індолилцтова кислота, цитокінін, етилен, гібереліни, саліцилова кислота, жасмонати, етилен та інше [255].

Висновки. Сільськогосподарський сектор відчуває величезну потребу у воді та енергії для задоволення потреб у харчуванні постійно зростаючого населення. Цей сектор споживає близько 70% поверхневих та підземних вод та 30 % світового виробництва енергії. Крім того, в даний час основні глобальні проблеми в галузі сільського господарства пов'язані із стійкими, економічно ефективними та екологічно чистими процедурами підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. За оцінками, глобальне виробництво продуктів харчування має бути збільшено як мінімум на 70 % до 2050 року, щоб задовольнити потреби постійно зростаючого населення в усьому світі. Недавня оцінка також показує, що чисельність світового населення зростає з великою швидкістю і, за прогнозами, до 2050 вона перевищить 2,4 мільярда осіб. Це призводить до надмірного використання хімічних добрив для підвищення врожайності продовольчих культур.

Проте витрати на енергію у сфері сільського господарства в основному включають споживання хімічних добрив, гербіцидів, пестицидів, техніки, насіння тощо. На додаток до цього, виробництво синтетичних добрив (NPK, промисловий синтез аміаку) і пестицидів використовує більше 1 % світового виробництва енергії, оскільки її виробництво залежить від вищих температури та тиску. Щорічне виробництво синтетичних азотних добрив становило близько 50 мільйонів тонн, при цьому споживалося близько $2,36 \times 10^{12}$ МДж енергії та виділялося 95,4 мільйона тонн еквівалента CO₂ та 19 тисяч тонн еквівалента SO₂.

Ці хімічні речовини забруднюють ґрунт, поверхневі та ґрунтові води через сільськогосподарські стоки, що може призвести до евтрофікації водойм, забруднюють навколишнє повітря викидами парникових газів і зрештою досягають вищого трофічного рівня за рахунок забруднення харчового ланцюга. Для пом'якшення негативного впливу синтетичних добрив на довкілля та підтримки продовольчої безпеки та зв'язку між водою, продовольством та енергією зростає інтерес до застосування мікроорганізмів для вирощування продовольчих культур. Різні попередні дослідження продемонстрували різні

переваги мікробних біодобрих для зростання та врожайності різних культур, таких як пшениця, рис, кукурудза, цибуля, соя тощо.

Ці біодобрива мають різні склади, що містять різноманітні живі мікроорганізми, здатні забезпечувати поживні речовини за допомогою біологічних процедур. Ці мікроби колонізуються в коренях і ризосферних областях після інокуляції на насіння або в ґрунт і по-різному сприяють зростанню та розвитку рослин. Вони безпосередньо допомагають пов'язувати атмосферний азот, виробляти сидерофори і розчиняти багато важливих мінералів, таких як цинк і фосфор, а також виробляти рослинні гормони, синтезувати деякі леткі сполуки або катаболічні ферменти, які допомагають у зростанні та розвитку рослин. Інші непрямі механізми дії мікробних стимуляторів росту рослин, що беруть участь у різних процесах, таких як виробництво вторинних метаболітів, що володіють антибіотичною дією або протигрибковими речовинами, інсектицидів та імунодепресантів, а також стимуляторів захисної системи рослин, що усуває атаку фітопатогенів. PGPF конкурують з фітопатогенами за простір та харчування та усувають їх завдяки своїм антибіотичним властивостям.

Отже, біодобрива можуть здійснювати різноманітні корисні взаємодії з рослинами, що призводить до значущих відкриттів у галузі стійкого та екологічно чистого сільського господарства. Основна перевага використання біодобрих перед хімічними добривами і пестицидами полягає в тому, що вартість виробництва продовольчого зерна знижується за рахунок більш низьких вимог до іригації, що виснажує рівень ґрунтових вод, та техніки, яка потребує або електрики, або викопного палива в генераторах, при транспортуванні його на поля. На додаток до цього, занепокоєння для худоби викликає шумове забруднення та викиди вихлопних газів, що викликають забруднення повітря. Ці проблеми можна звести до мінімуму за допомогою PGPR і PGPF замість хімікатів у польових умовах. Крім того, покращення виробництва продуктів харчування та енергетичної безпеки можна досягти за рахунок застосування біотехнологій, біопалива, біодобрих, скорочення експлуататорського

споживання за рахунок більш стійкого та ефективного використання ресурсів та скорочення відходів.

Постійно зростаючий попит на енергетичну та продовольчу безпеку вимагає першочергової уваги в сучасну епоху технологій. Розумним є використання зелених технологій для задоволення потреб у продовольстві та енергії шляхом застосування біодобрив, біопестицидів, тощо у сільськогосподарському секторі. Крім того, необхідні також поведінкові зміни, які включають відповідальне та стійке споживання природних ресурсів, мінімальне застосування хімікатів для підвищення продуктивності, скорочення утворення відходів, переробку та повторне використання відходів, щоб виявити компроміси та зменшити їх кількість між аспектами експлуатації ресурсів людиною та управління ресурсами Землі стійким та екологічно чистим способом.