

УДК (092)579.6

МІКРОБНА ЕКОЛОГІЯ: ВИВЧЕННЯ, ВПЛИВ, КОНЦЕПЦІЇ ТА СУЧАСНИЙ РОЗВИТОК СПАДЩИНИ УКРАЇНСЬКОГО МІКРОБІОЛОГА СЕРГІЯ ВІНОГРАДСЬКОГО

М. В. Патика

Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15; м. Київ, 02000, Україна; e-mail: npatyka@gmail.com

Внесок С. М. Виноградського в мікробну екологію

Мікробна екологія — галузь, що швидко розвивається, і в останні роки привернула до себе значну увагу як науковців, так і суспільства загалом. Дослідження мікроорганізмів та їхньої взаємодії з навколишнім середовищем сприяло численним відкриттям та здобуткам у нашому розумінні світу природи. Одним із піонерів у цій галузі є Сергій Миколайович Виноградський, український мікробіолог, який зробив значний внесок у вивчення мікробної екології.

Сергій Миколайович Виноградський широко відомий як фундатор мікробної екології. Його роботи наприкінці ХІХ — початку ХХ століття зробили революцію у вивченні мікроорганізмів та їхньої взаємодії з навколишнім середовищем. Проривне відкриття С. М. Виноградського літотрофів та хемоавтотрофів сформувало уявлення, що ці мікроорганізми можуть використовувати неорганічні сполуки як джерело енергії та відіграють важливу роль у біогеохімічних циклах, що відбуваються в природі. С. М. Виноградським розроблено методи накопичувальних культур, які дозволяли виділяти та вивчати специфічні мікроорганізми. Ця робота сприяла створенню концепції біогеохімічних циклів, яка лягла в основу фундаментальної концепції мікробної екології.

Сучасні дослідження в галузі мікробної екології розширили наше розуміння структури та функцій мікробних угруповань. Вивчення мікробної різноманітності та еволю-

ції виявило величезну кількість мікроорганізмів, що існують у природі, та їхню роль в екосистемних процесах. Застосування метагеноміки та інших молекулярно-біологічних методів дозволило дослідникам вивчати цілі мікробні угруповання та біоми без необхідності виділення в чисту культуру та культивування. Це дало можливість кращого розуміння механізмів взаємодії мікроорганізмів між собою та навколишнім середовищем, а також вплив аграрного використання ґрунтів на мікробні угруповання.

Майбутні напрями мікробної екології передбачають розробку нових технологій та аналітичних інструментів для більш детального вивчення мікроорганізмів. Дослідження екстремальних середовищ та невідомих складних мікробіомів, зокрема текстури (закономірності трофічного розташування) мікробіомів живих організмів, дозволить розкрити суть організації біомів та їхньої різноманітності, а також трофічні та функціональні механізми, що є в основі життєдіяльності мікроорганізмів. Виявлення ключових функціонально значимих мікроорганізмів та їхньої ролі в екосистемних процесах також перебувають у центрі уваги перспективних досліджень. Ці знання матимуть вирішальне значення для розробки природно адаптованих методів моніторингу, захисту та збереження довкілля.

Накопичувальна культура Виноградського

Накопичувальна культура Виноградського відіграла значну роль у розвитку

мікробної екології. Суть методу полягає у створенні селективних, тобто вибіркових, умов, які забезпечують розвиток переважно потрібних мікроорганізмів зі змішаних популяцій. У процесі створення селективних умов необхідне знання фізіологічних особливостей мікроорганізмів, які мають бути накопиченими.

Сучасні дослідження змістилися у бік розуміння структури та функцій мікробних угруповань. Останніми дослідженнями показано, що мікробні угруповання складні та динамічні: безліч різних видів взаємодіють один з одним та з навколишнім середовищем. Досягнення молекулярно-біологічних методів дослідження, таких як метагеноміка, дозволили ідентифікувати і вивчати раніше невідомі мікроорганізми. Вивчення мікробної різноманітності та еволюції дозволили краще зрозуміти походження та розвиток мікроорганізмів, а також їхню роль в екосистемних процесах. Дослідження середовищ і нових мікробіомів також буде пріоритетом, оскільки екстремальні середовища містять унікальні та різноманітні мікробні угруповання, які ще мають бути повністю досліджені. Ідентифікація мікроорганізмів, їхніх особливостей взаємодії та функцій в екосистемних процесах також стане найважливішим напрямом досліджень, оскільки дозволить зрозуміти, як мікробні угруповання можна використовувати для екологічних та промислових цілей.

Відкриття літотрофів та хемоавтотрофів

Відкриття автотрофів та хемоавтотрофів започаткувало революцію в нашому розумінні мікробної екології. Це стало наріжним каменем мікробної екології та допомогло зрозуміти роль мікроорганізмів в екосистемних процесах. Дослідження Сергія Виноградського сприяли відкриттю першого відомого хемоавтотрофа — тіобацил. Ця бактерія здатна окислювати сполуки сірки для отримання енергії та перетворювати вуглекислий газ на органічні сполуки. Це відкриття кинуло виклик домінантному на той час уявленню про те, що всім формам життя необхідне сонячне світло для отримання енергії, і проклало шлях до вивчення інших хемоавтотрофів.

Нещодавні дослідження також були спрямовані на застосування принципів мікробної екології в біотехнології та біоремедіації. Наприклад, виявилось успішним використання мікроорганізмів для очищення забруднених природних середовищ. Крім того, вивчення мікробних угруповань кишківника людини сприяло розробці пробіотиків та інших методів лікування, заснованих на мікробіомах. Досягнення в галузі методів візуалізації дозволяють детектувати мікробні угруповання в режимі реального часу, даючи уявлення про їхній трофізм, особливості функціонування та взаємодію. Крім того, дослідження екстремальних середовищ, таких як глибоководні гідротермальні джерела та полярні крижані насти, дозволить виявити нові мікробіоми та розкрити їхню адаптацію до таких умов. Виявлення корових (функціонально значимих) мікроорганізмів та їхня роль в екосистемах також перебуває у центрі уваги сучасних і пріоритетних досліджень. Це вимагає кращого розуміння мікробного різноманіття та розробки нових методів вивчення мікробних різнорівневих взаємодій. Зрештою, ці дослідження розкриють механізми функціонування екосистем нашої планети та те, який вплив має антропогенне навантаження на мікробні біоми взагалі.

Створення концепції біогеохімічних циклів

Мікроорганізми відіграють життєво важливу роль у біогеохімічних циклах, які необхідні для функціонування екосистем. Концепція біогеохімічних циклів була вперше розроблена С. М. Виноградським.

Сучасні дослідження у галузі мікробної екології значно просунулися з часів Виноградського. Сьогодні дослідники вивчають структуру та функції мікробних угруповань у різних екосистемах, їхню різноманітність та еволюцію, що сприяло відкриттю безлічі нових мікроорганізмів та поглибило знання про роль мікроорганізмів у біогеохімічних циклах. Розробляються нові методи дослідження мікробних угруповань (наприклад, одноклітинна геноміка), які дозволять вченим детальніше вивчати окремі мікроорганізми, прогнозувати вплив змін довкілля на екосистеми.

Сучасні тенденції, методології та проблеми в галузі мікробної екології

В галузі мікробної екології відбулася революція завдяки впровадженню передових методологій, що виникли внаслідок зближення різних наукових дисциплін. Зокрема, досягнення у галузі молекулярної біології та біохімії відіграли вирішальну роль у проливанні світла на складну роботу мікроорганізмів та їхні екологічні взаємодії. Ці підходи дозволили наблизитися до розкриття складності формування мікробних угруповань, надавши безпрецедентне розуміння їхніх функціональних можливостей. Використання передових методів молекулярної біології, таких як метагеноміка, транскриптоміка та протеоміка, дозволяє аналізувати генетичний склад мікробних консорціумів та розуміти закономірності експресії їхніх генів у відповідь на стимули навколишнього середовища. Крім того, ці методології були доповнені прогресом у генетиці та цитології, що полегшило детальний аналіз клітинних структур та процесів, які визначають функціонування мікроорганізмів. У сукупності ці технологічні інновації розширюють наше розуміння мікробної різноманітності, а також дозволяють відкривати нові мікроорганізми та їх потенційне застосування у різних галузях, від біоремедіації до медицини.

Спираючись на досягнення молекулярної біології та різні технологічні інструменти, що є у нашому розпорядженні, мікробна екологія ще більше поглибила розуміння екосистем, розкриваючи складну динаміку ґрунтових мікробних угруповань. Довгострокові дослідження не лише виявили величезний пул мікроорганізмів, але й радикально змінили наше сприйняття живої біомаси в біосфері. Зокрема, виявлено, що ґрунтові мікробні угруповання складаються переважно з мікроміцетів, а їхня біомаса перевершує наявні попередні оцінки. Це відкриття вимагає переоцінки ролі грибів у глобальних біогеохімічних циклах, припускаючи, що їхній внесок значно глобальніший, ніж вважалося раніше. Ба більше, зазначені дослідження дозволили детально описати сезонні зміни мікробного різноманіття та біомаси, що допомогло отримати більш детальну картину екологічного стану ґрунтів. Ця інформація

має вирішальне значення для розкриття механізмів секвестрації вуглецю, оскільки вказує на те, що мікробна біомаса, особливо грибна, становить значну частину запасів вуглецю в органічному матеріалі ґрунту. Отже, мікробна екологія не лише збагатила наше розуміння мікробного світу, але й дала важливі уявлення про параметри екологічних процесів, які впливають на здоров'я людини та екологічний гомеостаз планети.

Розуміючи властивості ґрунтових мікробних угруповань, можемо відзначити, що проблеми, які виникають у дослідженнях мікробної екології, є різноманітними й складними. Одним із завдань є необхідність розшифрувати особливості імунних реакцій людини на мікробні симбіонти (ця галузь набула популярності з усвідомленням того, що наше здоров'я нерозривно пов'язане з мікробіомом). Зазначена проблематика має комплексний характер, включно з розробкою біологічних продуктів, які можуть ефективно стимулювати ріст та підтримувати симбіотичні взаємодії між людиною та мікробними супутниками. Для досягнення цієї мети було зроблено значні зусилля з ініціювання великомасштабних проєктів, спрямованих на дослідження складнощів мікробної екології людини та використання цих знань у створенні пробіотиків. Такі проєкти є частиною глобального напрямку в екологічній біотехнології, мета якої — розуміння та використання механізмів, за допомогою яких мікробні асоціації розвиваються та взаємодіють із навколишнім середовищем. Проте для того, щоб ці зусилля були успішними, існує нагальна потреба інтегрувати дослідження мікробної сукцесії, перспективго, але складного нового напрямку в мікробній екології ґрунту. Цей комплексний підхід необхідний не лише для раціонального використання природних ресурсів та захисту довкілля, але й для розробки маломасштабних стійких біологічних продуктів, які можна безпечно інтродукувати в екосистеми. Діалог між дослідниками у цих міждисциплінарних галузях має вирішальне значення, а конференції, присвячені обміну ідеями з цих актуальних питань, відіграють важливу роль для визначення напрямку майбутніх досліджень у галузі мікробної екології.

Галузь мікробної екології зазнала трансформації з появою передових методологій, що поєднали різні наукові дисципліни (молекулярну біологію та біохімію, ґрунтову мікробіологію та екологію). Зосередивши увагу на ґрунтових мікробних угрупованнях, сучасні підходи стикаються зі складними проблемами, отже, існує необхідність інтегрувати дослідження мікробного біому. Нові підходи дозволили розкрити складність мікробних угруповань, надавши безпрецедентне розуміння їхніх функціональних можливостей. Дослідження показали, що ґрунтові мікробні угруповання мають генетичне різноманіття, що значно перевищує попередні оцінки. Отримані результати не лише збагатили наше розуміння мікробного світу, але й дали важливе уявлення про глобальні екологічні процеси на планеті.

Дослідження структури та функцій мікробних угруповань. Основні компоненти мікробних угруповань

Мікробні угруповання відіграють життєво важливу роль у функціонуванні екосистем, а їхня структура та функції протягом десятиліть є предметом інтересу дослідників.

Складна архітектура мікробних угруповань є в основі їх виживання та функціонування. Наприклад, біоплівки — яскравий приклад таких організованих структур. Біоплівки є по суті мікробними асоціаціями, які можуть бути як одновидовими, так і багатовидовими і захищені міжклітинними біополімерними матеріалами. Ці матеріали не тільки сприяють фізичній цілісності біоплівки, але й формують складну архітектуру, яка може змінюватися від шаруватих утворень до грибоподібних чи стовпчастих структур. Всередині цих біоплівок первинні колонізатори, якими є мікробні клітини, встановлюють початковий контакт із субстратом через різні поверхневі структури, такі як джгутики, пили, фімбрії та білки зовнішньої мембрани. Ця взаємодія має вирішальне значення, оскільки вона створює основу для формування структури біоплівки, яка містить як клітини мікроорганізмів, так і їхній позаклітинний матрикс. Цей матрикс складається з різноманітного набору хімічних компонентів, включно з кислими полісахаридами, глікозилфос-

фатмісткими біополімерами, глікопротеїнами та, в деяких випадках, поліглутаміновою кислотою, пептидами та позаклітинною ДНК. Зазначені компоненти є не тільки пасивними будівельними блоками, а швидше за все, вони активно співпрацюють для формування децентралізованих мережевих структур, які забезпечують стабільність та функціональність мікробних угруповань. Саме ці угруповання і взаємодія між різними компонентами біоплівки дозволяють формувати складні та динамічні структури, які є важливими для виживання та нормального функціонування мікробних угруповань.

У складній мережі екосистемних взаємодій компоненти людського тіла і мозку є складною мережевою структурою, що функціонує із чудовою координацією та інтеграцією. Ці елементи, як і мікробні системи, не діють ізольовано, а натомість демонструють високий рівень взаємопов'язаності та взаємозалежності. На відміну від людського організму та мозку, мікробні мережі з їхньою неієрархічною природою покладаються на безліч координаційних факторів, таких як міжклітинні контакти та хімічні сигнальні агенти, що забезпечують підтримку гомеостазу та реагування на зміни навколишнього середовища. Цей режим роботи дозволяє уникати жорсткої ієрархічної структури, яка, як зазначалося раніше, може бути більш схильна до порушень, враховуючи статичний характер її командного ланцюжка. Децентралізований підхід, що вимагає відсутності єдиного центру управління, має важливе значення для стійкості цих біологічних систем, допускаючи розподілену форму управління, яка може адаптуватися до умов, що постійно змінюються, та самоорганізовуватися.

У складній мережі життя мікробні угруповання відіграють роль, що виходить за межі простого існування, будучи ключовими гравцями в різних екологічних процесах. Наприклад, метагеномний аналіз бактеріального біому Азовського моря підтверджує значимість структури цих угруповань, показуючи, що вони є не випадковими сукупностями, а організовані групи зі специфічними функціями. Три основні екологічні групи мікроорганізмів, виявлені у недавньому дослідженні,

є яскравими прикладами цієї організації. Ці групи у природний спосіб змінюють одну одну у відповідь на зміну рівня засолення ґрунтів. Кожна з них виконує окремі екологічні функції, що мають вирішальне значення для підтримки балансу ґрунтових екосистем. Адаптивний перехід між мікробними групами підкреслює роль складу та структури цих угруповань у стійкості та стабільності довкілля. Ба більше, їхня структуроутворювальна функція очевидна в соціальній організації мікроорганізмів, яка відображає складність мережевих структур, що спостерігаються у більших біологічних об'єктах. Ця організація дозволяє мікробним угрупованням брати участь у складних взаємодіях зі своїми господарями, впливаючи на здоров'я та хвороби, про що свідчить оцінка мікробіому людини в таких умовах, як розсіяний склероз. Аналіз бактеріальних комплексів у фітосферах рослин додатково ілюструє закономірність цих угруповань, припускаючи значне поширення структурованих мікробіологічних систем у різних середовищах.

У дискусійних питаннях також підкреслюється соціальна організація мікроорганізмів, яка відображає складність мережевих структур, що спостерігаються у більших біологічних об'єктах.

Дослідження мікробного розмаїття та еволюції

В останні роки мікробна різноманітність та еволюція були в центрі уваги масштабних досліджень. Мікроорганізми, включно з бактеріями, археями та вірусами, поширені повсюдно та відіграють вирішальну роль у різних екологічних процесах.

Розуміння величезної та складної різнорівневої організації мікробної різноманітності біологічних систем має вирішальне значення, враховуючи, що мікробіота значно впливає на функції будь-якого організму, адаптацію та загальну реактивність. Історично склалося так, що проблемою була інструментальна неможливість культивувати значну більшість мікроорганізмів на елективних живильних середовищах, що обмежувало обсяг досліджень тими небагатьма мікроорганізмами, які можна було культивувати в лабораторних умовах. Проте з появою молеку-

лярно-біологічних методів дослідження, таких як секвенування 16S рибосомальної РНК, у дослідників з'явилася можливість аналізувати генетичний матеріал мікроорганізмів безпосередньо зі зразків навколишнього середовища. Цей метод, поряд з повногеномним секвенуванням, зробив революцію в мікробіології, надавши всебічне уявлення про мікробні угруповання, їхні організації й екологічні функції. Показано, що мікробний геном значно різноманітніший, причому його варіювання складає від 50 до навіть у 200 разів більше генів. Така приголомшлива генетична різноманітність стала ключем до відкриття нових ферментативних шляхів, відсутніх в організмі симбіонта, тим самим розширивши розуміння вкладу мікроорганізмів у метаболічні трофічні процеси. Ці передові методи діагностики, включно з секвенуванням 16S рибосомальної РНК, не лише розширили наші знання, а й значно покращили розуміння ролі унікальних метаболітів мікробіоти за взаємодії з макроорганізмом.

Як мікробна різноманітність змінюється з часом? Еволюція природи мікробної різноманітності додатково підкреслюється динамічними взаємодіями між бактеріями та їхніми хижаками, фагами. Показано, що фаги постійно адаптуються до бактеріальних популяцій, причому найбільш успішними є ті, які націлені на бактерії, що існували в недавньому минулому, приблизно 1–2 доби тому. Цікаво, що ці фаги демонструють знижену адаптацію як до наявних зараз бактерій, так і до тих, що з'являться завтра. Ця тимчасова невідповідність адаптації підкреслює швидку еволюцію бактеріального захисту, наприклад, того, що забезпечується системами CRISPR, які дозволяють бактеріям набувати імунітет проти фагів з надзвичайною швидкістю. Фагові мутації, які мають тенденцію ставати значно розповсюдженішими, здатні обійти найпоширеніший бактеріальний захист, зазвичай шляхом зміни їхніх протоспейсерних областей. На цю еволюційну «гонку озброєння» глибокий вплив має різноманітність та поширеність захисних механізмів усередині бактеріальних популяцій, оскільки вони визначають і спрямовують вплив на еволюцію фагів. Отже, мікробні

екосистеми та біотопи характеризуються потоком формування та розвитку метагеномної різноманітності. Нові захисні характеристики бактерій виникають і розповсюджуються, тим самим збільшуючи загальну резистентність і функціональну різноманітність мікробних угруповань протягом певного часу. Цей динамічний процес демонструє складну і швидку еволюцію мікробної різноманітності, оскільки організми постійно адаптуються до екологічних умов ландшафту, біологічних загроз і конкурентного тиску, що постійно змінюється.

Який вплив мікробної еволюції на екосистему? Динамічна взаємодія між мікробною еволюцією та екосистемами особливо очевидна у разі розгляду ролі патогенів у формуванні різноманітності їхніх господарів. Коли рідкісний вид починає поширюватися в умовах певної екосистеми, він у такий спосіб стає привабливою мішенню для патогенів. В основі цього явища лежить негативний частотно-залежний відбір, який за своєю суттю приносить користь організмам, менш поширеним у популяції. Отже, патогенні організми, які підвищують свою здатність уражувати найпоширеніші потенційні жертви, забезпечують відносне збереження популяцій рідкісних видів, опосередковано сприяючи формуванню біорізноманітності в екосистемах. Ця антагоністична коеволюція між патогенами та організмами-господарями є рушійною силою у формуванні, підтримці та розширенні біорізноманітності, оскільки вона потребує постійної адаптації та диверсифікації з обох боків. Оскільки патогени, що уражують певні види організмів, отримують вибірковий пріоритет, відбувається наступна ескалація впливу відбору, що змушує цих патогенів адаптуватися до захисних механізмів організму хазяїна, кількість яких раніше була мінімальна, але тепер збільшується. Ця перманентна еволюційна «гонка озброєння», що зумовлюється складними механізмами мікробної еволюції, такими як система CRISPR, наприклад, у бактерій, формує напрям внутрішньовидової різноманітності, одночасно стимулюючи безліч захисних стратегій проти постійної загрози з боку патогенів. Отже, концепція С. М. Виноградського дала можливість дослідити мікробну

еволюцію в екосистемах як складну адаптивну спіраль, у якій патогенні організми та їхні господарі постійно борються за виживання, що сприяє розвитку генетичного різноманіття, яке постійно змінюється і зумовлює створення базису гомеостазу та сталості екосистем.

Застосування метагеноміки та інших молекулярно-біологічних методів

Метагеноміка — напрям, що швидко розвивається і передбачає дослідження мікробних біотопів та угруповань з використанням молекулярно-біологічних методів. В останні роки відбулося значне розширення спектру застосування методичних підходів, які справді зробили революцію у розумінні людства щодо формування, функціонування та екологічної ролі мікробного світу.

Поява методів секвенування нового покоління значно розширила можливості метагеноміки, надавши дослідникам інструментарій для секвенування всієї геномної складової мікробних біомів. Ці передові молекулярно-біологічні методи дозволили не тільки отримати нуклеотидні послідовності, що охоплюють склад усіх генів, які присутні в кожному мікроорганізмі, але й взагалі у біомі. Широка доступність секвенування нового покоління сприяла появі спеціалізованих обчислювальних інструментаріїв, таких як алгоритми Eu-Detect та DeConseq, що відіграють важливу роль в уточненні метагеномних даних шляхом видалення забруднення геномної ДНК еукаріотів, особливо у зразках, отриманих із ґрунту. Саме такий рівень цілісності даних має вирішальне значення для наступних програм, таких як сервер швидкої анотації метагеноміки з використанням технології підсистеми (MG-RAST), який полегшує анотацію метагеномних послідовностей. До 2012 р. MG-RAST вже була накопичена величезна база даних, яка налічує понад 50 000 метагеномних послідовностей нуклеотидів, що підкреслює значне поширення та корисність цього сервісу. Ба більше, метагеноміка проклала шлях до досліджень функціонального та метаболічного різноманіття мікробних угруповань за межами того, що могли розкрити традиційні методи культивування на живильних середовищах. Тож можна з упевненістю сказати,

що вперше за багатовікову історію мікробіології було здійснено революцію в розумінні мікробної екології.

Які обмеження та перспективи молекулярних методів у метагеноміці? Попри значні досягнення у галузі метагеномного мікробного секвенування, сучасні молекулярно-біологічні методи мають обмеження, які необхідно враховувати у майбутніх дослідженнях. Невідповідність ефективності методів секвенування може призвести до різних результатів, що зі свого боку може вплинути на достовірність досліджень складних мікробних угруповань, зокрема виявлених у мікробіомі кишківника людини. Наприклад, застосування метагеноміки до мікробіому кишківника виявило різноманітну екосистему, що відіграє вирішальну роль у здоров'ї людини, проте рівень цієї різноманітності не повністю охоплено через певну методологічну недосконалість або обмеження. Крім того, незважаючи на перспективність метагеноміки у вивченні екології та різноманітності ґрунтових мікроорганізмів, всебічне дослідження біомів угруповань усе ще недосяжне, частково через неясне застосування метагеноміки та метабаркодування у ґрунтово-екологічних дослідженнях. Це вказує на гостру необхідність удосконалення метагеномних методів та розробки більш точного та послідовного інструментарію для відбору проб з навколишнього середовища. Майбутні перспективи цих молекулярно-біологічних методів полягають у їхньому потенціалі для вирішення фундаментальних проблем мікробної екології та опису мікробних угруповань взагалі, що на сьогодні стримується наявними технологічними обмеженнями.

Майбутні напрями досліджень мікробної екології

Останні досягнення в галузі технологій дозволили з'явитися новим методам, які можна використовувати для вивчення угруповань мікроорганізмів з більшою точністю. Проте вплив зміни клімату на мікробну екологію також стає все очевиднішим, і важливо розуміти, як ці зміни впливають на функціонування мікробних екосистем. До того ж потенційні застосування мікробної екології

в біотехнології є широкими і різноманітними, і дослідження в цій галузі можуть сприяти значним проривам у таких галузях, як медицина, аграрне виробництво та реновації навколишнього середовища.

З погляду розширення досліджень у галузі мікробної екології нові методи відкривають шлях до значних уточнень та відкриттів. Одним із таких нових напрямів є дослідження мікробних біомів у ґрунті. Цей підхід фокусується на еволюції та розвитку мікробних угруповань з часом, виявляючи основні параметри, що визначають динаміку всередині цих складних систем. Ці дослідження мають вирішальне значення, оскільки вони можуть допомогти у розробці складних рішень шляхом розуміння закономірностей функціональної та трофічної взаємодії корисних мікроорганізмів. Крім того, ці відкриття можуть зробити прорив у технологіях біоремедіації ґрунтів та використанні природних процесів, коли консорціями мікроорганізмів можна буде використовувати для трансформації забруднювачів у різних природних середовищах. Ба більше, дослідження мікробного різноманіття в екстремальних умовах виявило величезний функціональний потенціал екстремофільних мікроорганізмів, який можна використовувати для різних напрямів (від промислової біотехнології до управління навколишнім середовищем). Ці нові методи не лише розширюють знання в галузі мікробної екології, але й демонструють потенціал мікроорганізмів у вирішенні екологічних проблем та покращенні умов існування та здоров'я людини.

Як зміна клімату впливає на мікробну екологію? Спираючись на фундаментальні дослідження С. М. Виноградського та наступні масштабні дослідження в галузі мікробної екології, зазначимо, що вплив зміни клімату на мікробні системи, їхні взаємодії та особливості формування зумовлюють спрямованість розвитку ґрунтової мікробної екології, водночас особливе значення має важливість розуміння сукцесії мікробних комплексів як відповідь на зміни умов навколишнього середовища. Ці зміни є частиною динамічного процесу, на який впливають як біотичні, так і абіотичні фактори, до того ж можуть бути суттєві зміни через коливання

температурного режиму, вологості та доступності поживних речовин, спричинені змінами клімату. Вивчення цих сукцесійних змін має вирішальне значення, оскільки вони пов'язані з формуванням родючості ґрунту та ширшими функціями екосистем, які зумовлені мікробними процесами. Крім того, сьогодні актуальним у мікробній екології є питання — як зміни клімату можуть сприяти розробці нових стратегій біоремедіації, оскільки ці мікробні біоми та їхні угруповання є невід'ємною частиною трансформації забруднювальних речовин та колообігу ключових біогенних елементів. Такі дослідження стосуються не лише прямих наслідків мікробної сукцесії, але й того, як міжвидова конкуренція змінюється під впливом змін клімату, що потенційно може призвести до трансформацій у домінуванні та різноманітності мікробних популяцій. Ці дослідження закладають основу ерархічної структури у вивченні мікробної екології, узгоджуючи зусилля екологів із систематичної класифікації різних аспектів мікробних взаємодій та їхню відповідь на зміни клімату.

Які потенційні застосування мікробної екології в біотехнології? Сучасні досягнення в галузі мікробної екології та створення біологічних препаратів, потенційне застосування здобутків мікробної екології в біотехнології поширюються і на аграрну галузь, що сприяє розвитку виробничих процесів та захисту рослин. Одним із таких перспективних застосувань є розробка біологічних продуктів, отриманих із консорціумів ризосферних бактерій. Показано, що ці продукти індукують стійкість рослин до фітопатогенів та несприятливих умов навколишнього середовища, потенційно захищаючи посіви від хвороб та кліматичних стресів. Це не тільки передбачає прямий зиск для аграрного виробництва з погляду на здоров'я рослин, але і більш широкий вплив на гомеостаз агро-екосистем. Навіть більше, встановлено, що ці біопрепарати позитивно впливають на схожість насіння рослин, зокрема зернових, овочевих та технічних культур. Це вказує на потенціал застосування мікробних агентів для покращення життєздатності насіння та розвитку рослин, що сприяє збільшенню продуктивності і сталості аграрного вироб-

ництва. Крім того, сучасні дослідження свідчать, що використання цих біотехнологічних інновацій збільшує урожайність на 10–30 %, що є значним запасом у контексті глобальної продовольчої безпеки. Отже, мікробна екологія має значні перспективи для підвищення ефективності та стійкості аграрних екосистем за рахунок розробки нових біотехнологічних програм.

Розвиток нових технологій та аналітичних інструментів у мікробіології

Мікробіологія — це галузь, яка постійно динамічно прогресує з розвитком нових технологій та аналітичних інструментів. Зокрема, останніми роками значний інтерес викликають дослідження мікроорганізмів ґрунтових біомів. З появою нових технологій науковці отримали можливість виявити нові та покращити розуміння щодо формування мікробних угруповань та їхньої ролі в природних і антропогенно-змінених середовищах.

Нові технології в мікробіології докорінно змінюють наші способи ідентифікації та розуміння мікроорганізмів, що має важливе значення для цілої низки програм — від медичної діагностики до моніторингу довкілля. Мікрофлюїдика та пристрої «лабораторія на чипі» є важливим досягненням у цій галузі, пропонуючи можливість проводити складні аналізи більш раціональним та ефективним способом. Ці мініатюрні платформи дозволяють інтегрувати безліч лабораторних функцій в один чип, який може виконувати такі завдання, як підготовка проб, реакція, поділ та виявлення, часто з підвищеною чутливістю та специфічністю. Крім того, технологічною інновацією є розробка компактних тест-систем з використанням сучасних хромогенних середовищ. Ці системи є особливо перспективними для мікробіології, де вони дозволяють підвищити швидкість і точність виявлення патогенів, що є найважливішим фактором забезпечення здоров'я людини та безпеки довкілля. Об'єднавши ці передові технології, мікробіологічна наука має інструментарій, який забезпечується швидкою та точною ідентифікацією мікроорганізмів, що є важливим для своєчасного та ефективного реагування на загрози, пов'язані із патогенними мікроорганізмами та ін.

Як ці технології покращують вивчення ґрунтових мікроорганізмів? Інші інновації, що базуються на досягненнях мікрофлюїдики та технологій високопродуктивного секвенування ДНК, відіграють важливу роль у дослідженнях ґрунтових мікроорганізмів, що дозволяє забезпечити високий рівень точності та ефективності. Точність нових методів додатково підвищується за рахунок фотометричних технологій, які надають кількісні дані про розвиток мікроорганізмів, дозволяючи виявляти тонкі відмінності, які інакше могли б залишитися непоміченими. Ці технології не тільки підвищують точність досліджень, а й суттєво покращують їхню ефективність. Автоматизовані системи були розроблені для прискорення визначення чутливості ґрунтових мікроорганізмів до антибіотиків, що має вирішальне значення для оцінки їх стійкості та загальної поведінки. Такі системи можуть забезпечувати отримання результатів набагато швидше, ніж традиційні методи, тим самим прискорюючи темпи досліджень і дозволяючи вченим оперативніше реагувати на тенденції формування мікробної резистентності. Ба більше, завдяки використанню цих технологій стає можливим покращення диференціації ґрунтових мікроорганізмів на окремі категорії, такі як грампозитивні та грамнегативні коки та палички. Ця диференціація має вирішальне значення для точної ідентифікації та розуміння екологічної ролі, яку відіграють різні мікробні таксони у ґрунтовій екосистемі. Отже, інтеграція цих технологічних досягнень змінює вивчення ґрунтових мікроорганізмів, надаючи дослідникам набір потужних інструментів для дослідження мікробного світу з безпрецедентним рівнем деталізації та швидкості.

У розвитку мікробіологічних аналітичних інструментів стався помітний імпульс до спрощення процесу підготовки витратних матеріалів у лабораторіях. Істотним досягненням у цій галузі є створення готових до використання форм витратних матеріалів, які виключають традиційні трудомісткі методи приготування живильних середовищ. Ці нові продукти покликані допомогти мікробіологам, усуваючи рутинні завдання з автоклавування, приготування та розливу живильних

середовищ, тим самим знижуючи ймовірність забруднення та непостійності в процесі приготування середовищ. Крім того, впровадження живильних середовищ, насичених маркерами специфічної ферментативної активності, є кроком вперед у селективному мікробному аналізі. Ці маркери полегшують швидку ідентифікацію мікроорганізмів на основі їхніх ферментативних профілів, тим самим спрощуючи процес виявлення та вивчення конкретних бактерій чи грибів у зразку. Використання цих інноваційних середовищ дає змогу не тільки збільшити продуктивність мікробіологічних аналізів, але й підвищити специфічність, з якою вчені можуть визначати та аналізувати мікробну активність, що є вирішальним аспектом щодо великої різноманітності ґрунтових мікроорганізмів. Ці досягнення в галузі витратних матеріалів та живильних середовищ, разом із раніше згаданими технологіями мікробіологічного циклу та розрахунку цифрового профілю, мають вирішальне значення для модернізації мікробіологічних досліджень, пропонуючи більш точні та ефективні методи дослідження та розуміння мікробних екосистем.

Дослідження екстремальних умов та нових мікробіомів. У мікробіологічних дослідженнях екстремальні умови часто характеризуються фізичними та хімічними умовами, які є несприятливими для більшості форм життя, проте в них існують унікальні угруповання мікроорганізмів, здатних вижити в таких складних умовах. Ці середовища, зокрема геотермальні та гідротермальні джерела, кислі шахтні дренажі та полярні регіони, характеризуються екстремальними умовами, такими як високі або низькі температури, рівні рН або підвищені солоності. Наприклад, у полярних регіонах, особливо у ґрунтах Антарктики, мікроорганізми виконують важливі біосферні функції, підтримуючи різноманітність наземних екосистем, попри суворі холоди та високу дію УФ-випромінювання. Ці ґрунти є середовищем для життя мікроорганізмів з унікальними особливостями, таких як ціанобактерії із захисною пігментацією, що дозволяє існувати в екстремальних умовах. Дослідження в цьому екстремальному кліматі мають вирішальне

значення не лише для розуміння меж життя на Землі, але і для вивчення потенційного біотехнологічного застосування, оскільки екстремофіли можуть мати унікальні метаболічні шляхи і ферменти, які можна використовувати в промисловості та медицині.

Спираючись на обмежене розуміння ґрунтової мікробіоти в суворох умовах Антарктики, дослідники зосередили увагу на інших екстремальних середовищах, щоб виявити нові мікробіоти з унікальними характеристиками. Вивчення мікробних угруповань у таких середовищах виявило безліч архей, простих одноклітинних мікроорганізмів, що мають здатність існувати в умовах, які для більшості форм життя неможливі. Ці археї виявлені в різних місцях — від киплячих вод гейзерів до середовищ високого тиску на дні морів і океанів, що дозволяє зрозуміти стійкість життя і потенціал біологічних процесів. Цей потенціал став каталізатором вивчення ґрунтових мікробних угруповань і мікробіомів рослин та безхребетних тварин в екстремальних (у т. ч. стресових) умовах для використання їхніх унікальних ферментів для промислового застосування. Крім того, особливості існування цих угруповань мікроорганізмів, наприклад, виявлені за аналізу різних типів колонізації, сприяли кращому розумінню динаміки мікроорганізмів та стратегій їхнього виживання в екстремальних кліматичних умовах. Ці відкриття мають вирішальне значення для розробки стратегій захисту корисних мікробіомів від проникнення патогенів, що є важливим аспектом підтримки екологічного балансу та здоров'я місцевих видів.

Ідентифікація ключових мікроорганізмів та їхньої ролі в екосистемних процесах

Мікроорганізми відіграють значну роль у функціонуванні екосистем взагалі. Серед них особливе значення мають ґрунтові мікроорганізми, оскільки вони зумовлюють якісне проходження найважливіших екосистемних процесів. Вивчення цих мікроорганізмів необхідне для розуміння того, як вони сприяють функціонуванню екосистеми, і прогнозування того, як зміни довкілля можуть вплинути ці процеси.

У складній екосистемі ґрунту різноманітний набір мікроорганізмів відіграє важливу роль у підтримці здоров'я ґрунту та життя рослин. Серед цих мікроорганізмів кожен робить свій внесок у різні біогеохімічні процеси. Бактерії, з їх великою кількістю та метаболічною різноманітністю, мають ключове значення для колообігу поживних речовин, трансформації органічних речовин і навіть детоксикації забруднювальних сполук. Археї, хоча і менш поширені, ніж бактерії, але є невід'ємною частиною біоти, особливо в екстремальних умовах, де вони можуть виконувати унікальні метаболічні функції, такі як метаногенез. Гриби зі своїми великими міцеліальними мережами трансформують складні органічні матеріали, а також формують симбіотичні системи з кореневою системою рослин, поліпшують засвоєння рослинами водорозчинних поживних речовин. Крім того, в ґрунтовому середовищі існує мікрофауна, зокрема найпростіші й нематоди, які також трансформують органічну речовину та виконують регуляторні функції щодо мікробних популяцій за допомогою різних механізмів, таких як хижацтво та взаємодія. Цей весь у широкому розумінні біом разом створює динамічні та взаємозалежні складні різноманітні угруповання, які мають ключове значення для функціонування наземних екосистем.

Базуючись на фундаментальному розумінні того, що бактерії, археї та гриби домінують у мікробіомі ґрунту, можна глибше дослідити роль цих мікроскопічних організмів у підтримці гомеостазу та активності і складної функціональної здатності екосистеми. Ґрунтові мікроорганізми відіграють важливу роль у регулюванні клімату, оскільки вони беруть участь у секвестрації та метаболізмі вуглецю. Цей процес має життєво важливе значення для пом'якшення наслідків зміни клімату, оскільки мікроорганізми у взаємодії з рослинами поглинають вуглекислий газ з атмосфери та перетворюють його на органічні речовини, що збагачують ґрунт. Вони відіграють ключову роль у зменшенні емісії парникових газів, розщеплюють органічні забруднювачі та трансформують їх у менш шкідливі речовини. Все це є підвалиною глибоких екологічних перетворень

і поширює свій вплив на економіку і здоров'я людини, тим самим ілюструючи багатогранну важливість діяльності мікроорганізмів. Наприклад, особливості всередині мікробіому, такі як симбіотичні взаємодії між *Candidatus Doolittlea endobia* та *Candidatus Tremblaya princeps* у цитрусового борошнистого червця, демонструють диференціацію впливу, який має вирішальне значення для синтезу незамінних амінокислот і взагалі гомеостазу екосистем. Ці складні взаємозалежності свідчать про еволюційні адаптивності мікроорганізмів, які можуть швидко розвивати такі напрями, як метаболізм і стійкість до стресу, що ще більшою мірою впливає на функції екосистеми.

Які методи використовуються для визначення їхньої ролі в екосистемах? Щоб з'ясувати конкретну роль ґрунтових мікроорганізмів у екосистемах, використовується багато сучасних методів. Метагеномні дослідження *in situ* надають цінний інструмент для картування складних взаємодій між мікробними угрупованнями шляхом вивчення закономірностей спільного існування видів, припускаючи потенційні синергетичні чи антагоністичні взаємодії, які визначають їх поширення та чисельність. Ця взаємодія додатково досліджується за допомогою таких методів, як транскриптоміка та метаболомі-

ка, які дозволяють контролювати експресію генів та вироблення метаболітів у мікробних угрупованнях, тим самим розкривати механізми щодо функціональних можливостей різних видів та їхній внесок у формування і функціонування екосистеми взагалі. Для безпосереднього дослідження мікробних взаємодій та їхнього подальшого впливу на структуру та функції угруповань створюються експериментальні установки, в яких мікробні угруповання досліджуються в контрольованих умовах. Такий підхід дає змогу оцінити міжвидові взаємодії, закладаючи основу для кращого розуміння того, як ці мікроорганізми організують свій колективний вплив на екосистемні процеси. Крім того, застосування цільових підходів, таких як парний скринінг або вибіркоче видалення видів, дає уявлення про те, як відсутність або зміна одного виду може призвести до змін, що спостерігаються у фенотипі угруповання, забезпечуючи більш чітке уявлення про роль кожного виду в більш широкому угрупованні. У сукупності ці методологічні досягнення дозволяють точніше інтерпретувати те, як ґрунтові мікроорганізми підтримують життєво важливі функції екосистеми, особливо у сферах аграрного виробництва, здоров'я людини та регулювання клімату.