

ЕФЕКТИВНІСТЬ МІКОРИЗОУТВОРЮВАЛЬНИХ ГРИБІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ СОНЯШНИКА (*HELIANTHUS L.*)

С.О. Мазур¹, Д.О. Шацман², С.С. Бухтик¹

¹Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: mazurlanalana@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5025-0134
e-mail: s.buhtik@profi.land; ORCID: 0009-0000-2543-7346

²ТОВ «Євросем» (м. Київ, Україна)
e-mail: ds@profi.land; ORCID: 0009-0000-1645-2499

Сучасні екологічні методи ведення агровиробництва потребують зменшення використання хімічних добрив і пестицидів та заміну їх на альтернативні безпечні й водночас високоефективні засоби. Це особливо актуально для технологій вирощування основних експорторієнтованих культур, серед яких важливе місце в Україні і світі посідає соняшник (*Helianthus L.*). Перспективним напрямом є застосування біологічних препаратів на основі мікоризоутворювальних грибів, які покращують ріст і розвиток рослин через ефективний симбіоз із кореневою системою. З цієї метою досліджували вплив біологічного препарату на основі мікоризоутворювальних грибів Міковітал у технології вирощування соняшника на продуктивність та мікобійм ґрунту. Встановлено, що використання препарату Міковітал спричинило збільшення врожайності соняшника на 25,5% та отримання приросту врожаю насіння 0,59 т/га за поліпшених показників якості насіння (маси 1000 насінин та олійності). До того ж препарат сприяв підвищенню площі активних коренів на всіх етапах розвитку рослин, зокрема, у фазі бутонізації ВВСН 61–69 площа активних коренів зростає на 5,2 см², у фазі цвітіння (ВВСН 71–79) — на 4,9 см², що забезпечило рослинам ефективніше поглинання води та поживних речовин. Виявлено, що збільшення листкової поверхні (у фазі появи 2 трійчастого листка ВВСН 10–19 на 0,5 дм², у фазі бутонізації ВВСН 61–69 — на 1,5 дм², у фазі цвітіння ВВСН 71–79 — на 2,1 дм²) сприяло підвищенню фотосинтетичної активності та продуктивності рослин. Застосування препарату позитивно вплинуло на ґрунтовий мікобійм, зокрема відмічено посилення чисельності корисних мікроорганізмів у ґрунті, як-от амоніфікувальні бактерії та стрептоміцети, а також появи нових видів мікроміцетів, таких як *Trichoderma* і *Glomus*. Зазначено свідчить про розширення біорізноманіття ґрунту агроценозу соняшника, а також домінування процесів деструкції над синтезом органічної речовини ґрунту. Загалом, використання біологічного препарату Міковітал на основі мікоризоутворювальних грибів виявилось ефективним засобом для поліпшення росту, розвитку та врожайності соняшника, забезпечення стабільності рослин у стресових умовах, а також оптимізації структури ґрунтового мікобійму.

Ключові слова: агроecosистема, мікоризація, гетеротрофне живлення рослин, мікобійм, мікроорганізми, агротехнології, олійні культури.

ВСТУП

Сучасні вимоги аграрного виробництва орієнтують агровиробників застосовувати заходи підвищення врожайності сільськогосподарських культур за одночасного зменшення використання хімічних добрив і пестицидів. Це особливо актуально для вирощування соняшника, однієї з найважливіших олійних культур у світі та Україні

[1]. Серед перспективних напрямів у цьому контексті є застосування препаратів на основі мікоризоутворювальних грибів, які здатні поліпшити ріст та розвиток рослин за рахунок ефективного симбіозу з кореневою системою.

Мікориза — це симбіоз грибів та коренів вищих рослин, що забезпечує покращене поглинання води та поживних речовин, особливо фосфору, азоту і мікроелементів.

Низкою досліджень доведено, що мікоризоутворювальні гриби можуть істотно підвищити стійкість рослин до стресових умов, як-от посуха, засолення та патогени. Крім того, вони сприяють поліпшенню структурних властивостей ґрунту та активізації мікробіоти, що загалом покращує екологічний стан ґрунту та його родючість [2].

Метою цієї роботи є вивчення впливу біологічного препарату Міковітал на основі мікоризоутворювальних грибів на ріст, розвиток та продуктивність соняшника (*Helianthus L.*). Зокрема, досліджується його вплив на врожайність, морфологічні показники рослин, а також на чисельність і склад ґрунтових мікроорганізмів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Нині світова спільнота екологів, біологів, ґрунтознавців та інших спеціалістів занепокоєна серйозністю проблеми втрати здатності ґрунту ефективно функціонувати [3], до того ж такі загрози набули глобального характеру. Однією з найзначніших проблем є виснаження ґрунту, яка спричиняє втрату родючого шару та погіршення

його якості. Іншим аспектом є зниження рівня органічного вуглецю в ґрунті, що діє на його родючість та здатність утримувати воду й поживні речовини. Надмірне використання додаткових ресурсів, зокрема пестицидів та мінеральних добрив, призводить до дисбалансу поживних речовин у ґрунті, що негативно впливає на його функціонування, зменшуючи біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів [4]. Зниження родючості ґрунтів у світі є наслідком сільськогосподарських практик, як-от інтенсивні технології вирощування, монокультура та неправильні методи обробітку ґрунту. Все це зумовлює втрату ґрунтової родючості через зменшення врожайності сільськогосподарських культур [5].

У цьому контексті використання мікоризних грибів [6] у технологіях вирощування сільськогосподарських культур набуває перспективності серед екологічних, науково обґрунтованих підходів до підвищення родючості ґрунту. Відтак вони сприяють покращанню здатності рослин поглинати воду та поживні речовини, як-от азот, фосфор, калій [7], що, своєю чергою, позитивно впливає на їх продуктивність та стан.

Бібліометричний аналіз із використанням систематичного огляду відповідно до підходу PRISMA (рис. 1) на основі бібліометричних даних PubMed за допомогою програмного забезпечення VOSviewer та проведеного факторно-кластерного аналізу Torres-Reyna, виявив, що за ключовими словами «Мікориза», «Рослинництво» та «Вплив мікоризоутворювальних грибів на сільськогосподарські культури» нині світова наукова спільнота опублікувала близько 2500 наукових праць.

Серед яких слід відмітити такі напрями, як вплив мікоризоутворювальних грибів на мікроорганізми ґрунту, на симбіотичну діяльність мікробіоти та біорізноманіття. Наразі ведеться скринінг механізмів та молекулярно-генетичних властивостей мікоризоутворювальних грибів для підтримки стабільності та родючості ґрунтів. Варто зазначити, що активного розвитку дослідження присвячені мікоризоутворюваль-

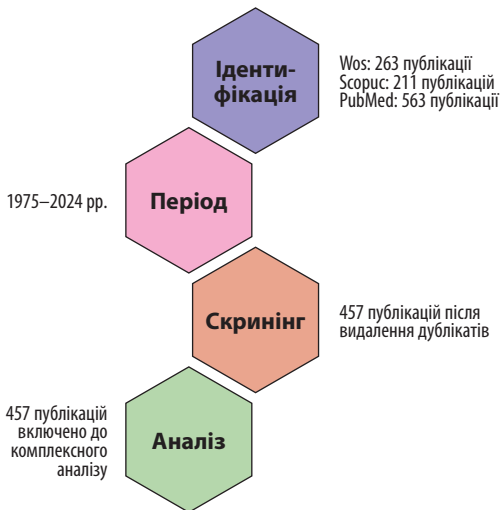


Рис. 1. Етапи вибору публікацій для комплексного аналізу з урахуванням підходу PRISMA

Примітка: розроблено авторами.

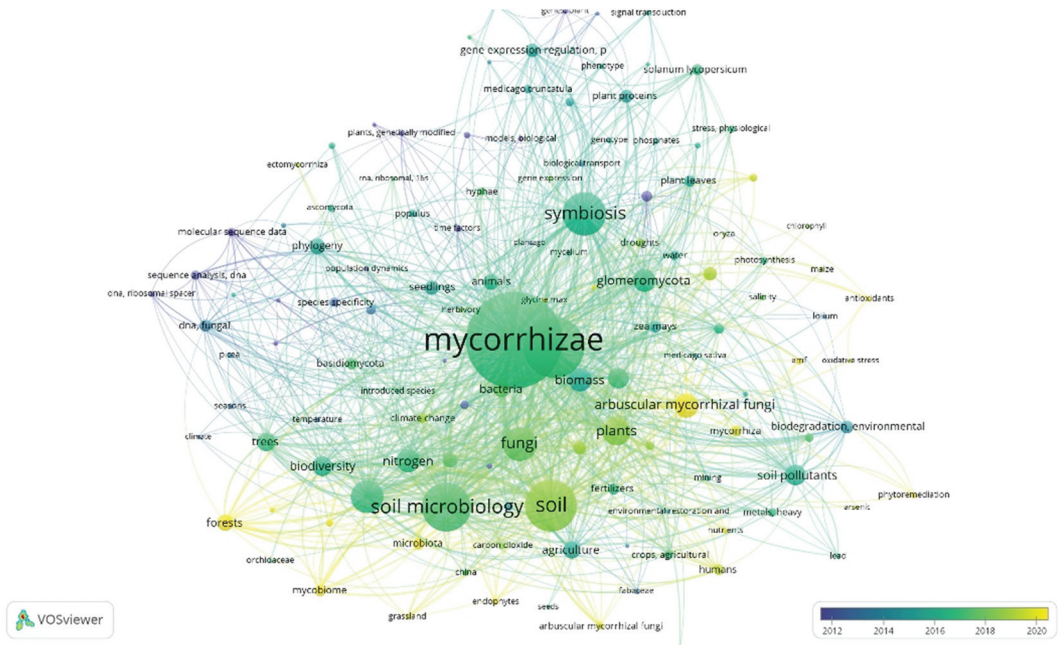


Рис. 2. Аналіз публікаційної активності впливу мікоризоутворювальних грибів на мікробіом ґрунту

Примітка: розроблено авторами з використанням програмного забезпечення VOSviewer (URL: <https://www.vosviewer.com/>).

ним грибам та їх впливу на сільськогосподарські культури, зокрема соняшник (*Helianthus L.*), розпочалися лише в XXI ст. і ведуться з використанням найсучасніших методів дослідження (рис. 2).

Мікоризні гриби є основою трофічних взаємозв'язків в екосистемах та відіграють важливу роль у підтримці стабільності й родючості ґрунтів [8]. Відомо, що значну частку вуглеводів (до 20%) [9; 10] мікоризні гриби отримують від рослини-хазяїна. До того ж ліпиди, які є важливим джерелом органічного вуглецю для грибів, також постачаються рослиною-хазяїном [10; 11]. Виявлено, що у мікоризних грибів відсутні гени, що кодують біосинтез жирних кислот, без яких їх ріст та розвиток неможливий. Гриби, завдяки симбіозу з рослинами-хазяїнами, використовують жирні кислоти, які транспортуються до них рослинами [12].

Мікоризні гриби не лише впливають на ріст, розвиток та продуктивність рослин, але

також покращують характеристики ґрунту, як-от агрегація ґрунту, доступність поживних речовин у ґрунті, утримання води, активність мікроорганізмів, кругообіг азоту, вуглецю, фосфору, а також здійснює корекцію кислотності ґрунту [13; 14]. Наприклад, Wang et al. (2020) [15; 16] наголошують, що інокуляція арбускулярними мікоризними грибами спричиняє збільшення поглинання фосфору на 30–40% порівняно з контрольними рослинами.

Дослідження також свідчать про важливу роль грибів у забезпеченні стійкості рослин до різних стресових умов, що робить їх важливим компонентом екосистем у сучасних умовах надмірного техногенного навантаження та змін клімату. Дослідженнями Sun et al. (2019) [17] встановлено, що рослини *Helianthus L.*, інокульовані арбускулярними мікоризними грибами, виявляють підвищену стійкість до водного дефіциту, що виражається у вищій водоутримувальній здатності листків та поліп-

шеній ефективності водокористування. Це відбувається завдяки покращанню поглинання мінеральних елементів і води, а також підвищенню ефективності фотосинтезу. Наприклад, за даними експериментів, рослини соняшника, оброблені арбускулярними мікоризними грибами, мали значно більшу висоту, кількість листків та масу кореневої системи порівняно з контролем [18].

Мікоризоутворювальні гриби також сприяють підвищенню стійкості соняшника до біотичних та абіотичних стресів. Зокрема, мікориза може знизувати негативний вплив засолення ґрунту, важких металів та патогенів. Це досягається завдяки поліпшенню фізіологічного стану рослин та активації їх захисних механізмів, включаючи синтез антиоксидантних ферментів та посилення вмісту фітогормонів [19; 20].

Інші дослідження зосереджуються на взаємодії таких грибів з іншими ґрунтовими мікроорганізмами та впливом цієї взаємодії на ріст і розвиток соняшника. Gao et al. (2021) [21] встановили, що спільна інокуляція арбускулярними мікоризними грибами та азотфіксувальними бактеріями значно підвищує біомасу рослин і вміст хлорофілу у листках, що свідчить про синергетичний ефект цих мікроорганізмів. Також слід наголосити, що застосування мікоризоутворювальних грибів за вирощування *Helianthus L.* сприяє зниженню потреби у хімічних добривах, що має важливе екологічне значення [22]. Дослідження Mahdi et al. (2022) [23] довели, що така інокуляція дає можливість зменшити використання фосфорних добрив на 25–30% без зниження врожайності. Сучасні дослідження підтверджують значний потенціал використання мікоризоутворювальних грибів у агротехніці соняшника. Інокулянти на основі мікоризоутворювальних грибів не лише покращують мінеральне живлення і ріст рослин, але й підвищують їх стійкість до стресів та зменшують потребу у хімічних добривах, що є важливим кроком до сталого сільського господарства.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено в Інституті агроєкології і природокористування НААН та дослідному полігоні для практичних польових досліджень ТОВ «Поле знань» (с. Циганське Полтавського р-ну Полтавської обл. (49.59497902582635, 34.27436857272788)). Методологічною основою наукових досліджень є моніторингові дослідження, системний та статистичний аналіз. Дослідження проводили на соняшнику ультрараннього гібрида Тор Сумо, що характеризується стійкістю до вовчка (*Gryllotalpa gryllotalpa L.*) та несправжньої борошністої роси (*Peronosporales*) (оригіратор – Інститут рільництва і овочівництва НС Семе, м. Нові Сад, Сербія).

Основним обробітком ґрунту на дослідних ділянках стала весняна, заглибошка 20–25 см, дворазова передпосівна культивування на глибину 4–6 см. Попередником був соняшник, удобрення не вносилося. Повторюваність досліду триразова з рандомним розміщенням ділянок (20,16 м²). Відбори здійснювали впродовж онтогенезу рослин, у фазі ВВСН 10–19 (поява 2 трійчастого листка), ВВСН 61–69 (цвітіння), ВВСН 71–79 (налив зерна).

Система захисту: досходове внесення гербіциду Екстракорн 4,3 л/га на 3-тю добу після сівби, післясходове внесення гербіциду Гранстар у фазі 4–6 листків культури.

Міковітал – біологічний препарат на основі мікоризоутворювального гриба *Tuber melanosporum* з наявністю біологічно активних продуктів метаболізму цього гриба (ТУ У 20.2-2284902511-001:2017). Насіння соняшника гібрида Тор обробляли із розрахунку 1,5 л/т насіння безпосередньо перед посівом.

Погодно-кліматичні умови періоду дослідження відповідали оптимальним значенням, хоча слід зауважити, що за вегетаційний період у середньому, порівняно із середньою багаторічною нормою, випало на 22% більше опадів. Недостача опадів за червень була компенсована за рахунок накопичення запасів у травні та надходженням у липні (рис. 3). Температурний режим

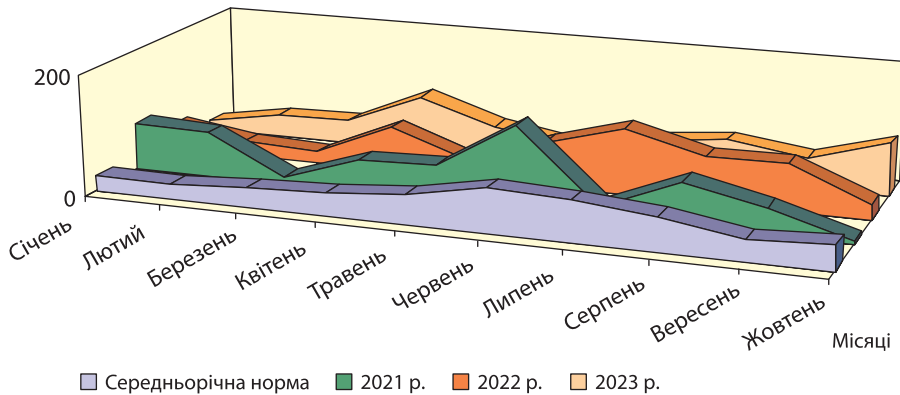


Рис. 3. Динаміка надходження опадів упродовж вегетаційного періоду соняшника

за період вегетації соняшника був підвищеним (сума активних температур за період квітень–жовтень становила 2852°C), що вказує на її поступове збільшення.

Агрохімічне обстеження земель сільськогосподарського призначення проводили відповідно до керівного нормативного документа «Методика суцільного ґрунтово-агрохімічного моніторингу сільськогосподарських угідь України», «Еколого-агрохімічна паспортизація полів та земельних ділянок», «Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення», якісну оцінку обстежених ґрунтів – за Р. Панасом.

Зразки ґрунту відбирали з глибини 0–30 см відповідно до ДСТУ 4287:2004. У них визначали вміст гумусу за ДСТУ 7828:2015, реакцію ґрунтового середовища за ДСТУ 8346:2015, вміст сполук азоту, що легко гідролізуються за ДСТУ 7863:2015, рухомих сполук фосфору та калію за ДСТУ 4115-2002.

Відбір зразків ґрунту для мікробіологічних досліджень, визначення чисельності мікроорганізмів основних еколого-трофічних та таксономічних груп проводили загальноприйнятими методами (ДСТУ 7847:2015). Спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунту здійснювали за К. Андреюк, Г. Іутинською зі співавт., розраховуючи екологічні коефіцієнти [24].

Біомасу мікроорганізмів у ґрунті виявляли регідраційним методом шляхом

реєстрації кількості мікробної маси за сумою вуглецю органічних речовин і розраховували за формулою:

$$X = (C_v - C_k) / (0,3), \quad (1)$$

де X – біомаса (мкг С/г ґрунту); C_v і C_k – вміст розчинних органічних речовин відповідно у висушеному і контрольному ґрунті; 0,3 – перерахунковий коефіцієнт, який за своїм значенням відображає частку клітинних компонентів, які перейшли в розчин у результаті висушування (регідрації) [24].

Інтенсивність емісії діоксиду вуглецю з ґрунту визначали абсорційним методом Штатнова за кількістю вуглекислого газу, який утворився у процесі респірації «дихання» ґрунту і поглинання розчином NaOH , обчислювали за формулою:

$$\text{CO}_2 = \frac{2,2 \times (V_1 + V_2)}{m \times T}, \text{ мг/г за добу}, \quad (2)$$

де V_1 – кількість 0,1 н розчину NaOH , мл; V_2 – кількість 0,1 н розчину HCl , мл; m – маса ґрунту, г; T – час інкубації, доба.

Показник частоти трапляння (%) видів мікроміцетів визначали за загальноприйнятною методикою [25].

Відбори для фенологічних досліджень здійснювали впродовж онтогенезу рослин, у фази ВВСН 10–19 (поява 2 трійчастого листка), ВВСН 61–69 (цвітіння), ВВСН 71–79 (налив зерна).

Визначення продуктивності (висота, маса рослин), а також площу листової поверхні рослин соняшника здійснювали згідно із загальноприйнятою методикою [25].

Площу листової поверхні розраховували, використовуючи параметри довжини та ширини листка за формулою Б.А. Доспехова [24]:

$$S = k \times l \times n, \quad (3)$$

де S – площа листків, см²; k – середній поправочний коефіцієнт, що становить 0,67; l – довжина листків, см; n – ширина листка в найширшому місці, см.

Математичний аналіз здійснювали та опрацьовували за допомогою програм Statistica 10 (StatSoft. Inc., 2011) і Microsoft Excel 2010. Для виявлення відмінностей між середніми значеннями застосовували критерій Стьюдента. Порівняння великих масивів даних для встановлення кореляційних зв'язків проводили на основі багатofакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) – визначали середні значення, дисперсію, похибки.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження впливу препарату Міковітал у технології вирощування соняшника (*Helianthus L.*) здійснювали на території, яка характеризується достатнім рівнем зволоження. Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем типовий малогумусний, що належить до групи найбільш сприятливих ґрунтів для вирощування польових культур. Попереднє агрохімічне обстеження ґрунту дало змогу нам встановити, що вміст гумусу в горизонті 0–20 см становив 3,9%, а в горизонті 35–45 см – 3,05%. Слід відзначити, що ємність поглинання в орному шарі була досить високою і сягала 32,5 мг-екв/100 г ґрунту, реакція ґрунтового розчину виявилася слабкислою (рН = 6,2).

Визначено, що в орному шарі досліджуваного ґрунту міститься близько 11,5 мг азоту сполук, що гідролізується (за ДСТУ 7863:2015), 11,3 мг рухомих сполук фосфору (за ДСТУ 4115-2002), та 15,6 мг/кг ґрунту калію (за ДСТУ 4115-2002).

Аналізуючи дані щодо впливу препарату Міковітал на ріст та розвиток рослин, встановлено, що у фазі появи 2 трійчастого листка застосування мікоризоутворювального препарату спричинило незначне збільшення висоти рослин (на 3 см), що свідчить про стимулювальний ефект препарату на початкових етапах розвитку. У фазі бутонізації та цвітіння висота рослин практично не відрізняється від контролю, що може доводити те, що на більш пізніх етапах розвитку рослин висота стабілізується і вплив біопрепарату на цей показник нівелюється.

У сучасному агрономічному дослідженні значна увага приділяється розвитку кореневої системи, яка є ключовим елементом забезпечення рослин водою та поживними речовинами. Одним із важливих показників ефективності кореневої системи є площа активних коренів та питома активна поверхня кореневої системи, що характеризує здатність рослин до поглинання необхідних для їх життєдіяльності речовин. Окремо треба наголосити, що саме мікоризоутворювальні гриби через формування додаткових гіф та стимуляції розвитку кореневих волосків, які проникають у ґрунт, розширюють розмір кореневої системи, а їх гіфи діють як продовження кореневої системи, збільшуючи загальну площу контактної поверхні з ґрунтом. Це дає змогу рослинам поглинати більшу кількість води і поживних речовин, як-от фосфор, азот, калій та мікроелементи, які часто є важкодоступними у звичайних умовах.

Встановлено, що у фазі появи 2 трійчастого листка у рослин соняшника площа активних коренів рослин, оброблених Міковіталом, підвищується на 1,7 см² порівняно з контролем. Це незначне зростання свідчить про початковий позитивний вплив препарату на розвиток кореневої системи. На ранніх стадіях росту рослин коренева система закладає основу для майбутнього розвитку, тому навіть невелике збільшення площі активних коренів може мати важливе значення, що зумовлено стимуляцією ділення клітин та покращанням мікроекологічних умов у ризосфері, що

сприяє посиленню інтенсивного розвитку кореневих волосків і підвищенню загальної площі активної поверхні кореневої системи (табл. 1).

У фазі бутонізації спостерігається значне збільшення площі активних коренів на 5,2 см² за впливу Міковіталу, що засвідчило підвищення потреби рослин у воді та поживних речовинах у цей критичний період розвитку. Фаза бутонізації є одним із найбільш енергозатратних етапів, коли рослини інтенсивно використовують ресурси для формування бутонів та підготовки до цвітіння. Підвищена площа активних коренів забезпечує більш ефективне поглинання води та мінеральних речовин, необхідних для підтримки високих темпів метаболічних процесів. Міковітал у цьому контексті діє як стимулятор, який активізує ріст кореневої системи, що дає можливість рослинам краще адаптуватися до умов зовнішнього середовища та забезпечує їхні потреби на етапі бутонізації.

У фазі цвітіння також спостерігали збільшення площі активних коренів на 4,9 см²

за дії Міковіталу. Це вказує на тривалий вплив препарату щодо розвитку кореневої системи. Під час цвітіння рослини потребують стабільного постачання води й поживних речовин для підтримки процесів фотосинтезу та репродуктивного розвитку. Збільшена площа активних коренів дає змогу рослинам більш ефективно задовольняти ці потреби, забезпечуючи стійкість до стресових чинників, як-от посуха або нестача поживних речовин у ґрунті. Продовження впливу Міковіталу на кореневу систему у фазі цвітіння пов'язано з його здатністю підтримувати високий рівень кореневої активності, що є критично важливим для забезпечення оптимальних умов для плодоношення.

Отже, підвищення площі активних коренів на всіх етапах розвитку за використання біологічного препарату Міковітал свідчить про посилення питомої активної поверхні кореневої системи. Проведений кореляційний аналіз показників вказує на пропорційну лінійну залежність, оскільки коефіцієнт детермінації виявився близь-

Таблиця 1. Вплив мікоризоутворювальних грибів на біометричні показники соняшника

Показник	Контроль	Міковітал, 1,5 л/т	НІР _{0,5}
<i>ВВСН 10–19 (явля 2 трійчастого листка)</i>			
Висота рослин, см	95	98	1,2
Площа активних коренів, см ²	56,9	58,6	1,34
Питома активна поверхня кореневої системи	0,21	0,21	0,01
Площа листової поверхні, дм ²	9,4	9,9	1,3
Індекс листової поверхні, м ² /м ²	1,49	1,54	
<i>ВВСН 61–69 (цвітіння)</i>			
Висота рослин, см	197	198	1,2
Площа активних коренів, см ²	90,1	95,3	1,34
Питома активна поверхня кореневої системи	0,28	0,37	0,01
Площа листової поверхні, дм ²	22,6	24,1	1,3
Індекс листової поверхні, м ² /м ²	3,40	3,76	
<i>ВВСН 71–79 (налив зерна)</i>			
Висота рослин, см	199	199	1,2
Площа активних коренів, см ²	91,5	96,4	1,34
Питома активна поверхня кореневої системи	0,31	0,39	0,01
Площа листової поверхні, дм ²	25,7	27,8	1,3
Індекс листової поверхні, м ² /м ²	4,01	4,34	

ким до одиниці ($R=0,81$), між показником площі активних коренів та показником питомої активної поверхні кореневої системи. Особливо значний приріст відзначається у фазах бутонізації та цвітіння (на 0,09 і 0,08 відповідно), що вказує про стимуляцію розвитку корневих волосків та покращання поглинальної здатності кореневої системи.

Ще одним критичним показником підвищення врожайності сільськогосподарських культур є площа листової поверхні та його індекс, що визначає здатність рослин до фотосинтезу, випаровування води й обміну газами. Виявлено, що у фазі появи 2 трійчастого листка площа листової поверхні рослин із застосуванням мікоризоутворювального препарату збільшувалася на 0,5 дм², що засвідчило ранній стимулювальний ефект препарату, який сприяє інтенсивнішому розвитку асиміляційного апарату. На етапі бутонізації посилення площі листової поверхні становило 1,5 дм², що вказує на поліпшену здатність рослин поглинати більше світлової енергії та продуктивніше проводити фотосинтез, що є основою для подальшого успішного розвитку. У фазі цвітіння збільшення площі листової поверхні досягає 2,1 дм². Цей показник є особливо важливим, оскільки у даній фазі рослини потребують максимального обсягу асиміляційної поверхні для забезпечення процесів формування плодів. Посилення площі листової поверхні за використання Міковіталу вказує на його здатність підтримувати високий рівень метаболічної активності рослин навіть у критичні періоди розвитку.

Дослідженням впливу біологічного препарату Міковітал на розвиток соняшника встановлено, що застосування препарату призвело до збільшення середнього діаметра кошика від 16,1 см (контроль) до 17,3 см, що свідчить про покращання умов для росту і розвитку рослини, оскільки ширший діаметр кошика часто асоціюється з більшою кількістю та якістю насіння. До того ж також зросла й маса 1000 насінин та поліпшився показник олійності (від 51,48% (контроль) до 52,61% (Міковітал)) насіння соняшника, що також підтверджує гіпотезу позитивного впливу біологічного препарату мікоризоутворювальної дії Міковітал на ріст та розвиток рослин, що є важливим для підвищення якості врожаю. Слід зазначити, що водночас показник лузжистості залишався на практично однаковому рівні (0,98–0,99%), що аргументує стабільність розвитку соняшника за використання біологічного препарату Міковітал (табл. 2).

Урожайність є інтегральним показником, який відображає загальну продуктивність агроценозу та визначає економічну ефективність вирощування сільськогосподарських культур. У контрольних зразках урожайність *Helianthus L.* становила 2,31 т/га. Після застосування Міковіталу цей показник підвищився до 2,90 т/га, що відповідає збільшенню на 0,59 т/га. Враховуючи критичне значення різниці ($НІР_{0,5}$) у 0,15 т/га, цей приріст є статистично значущим і свідчить про ефективність препарату. Таке істотне підвищення врожайності можна пояснити сукупним впливом Міковіталу на кілька ключових показників, як-от діаметр кошика, маса 1000 насінин та олійність.

Таблиця 2. Урожайність соняшника та якісні показники насіння за застосування мікоризоутворювального препарату

Показник	Контроль	Міковітал, 1,5 л/т	$НІР_{0,5}$
Діаметр кошика, см	16,1	17,3	1,2
Маса 1000 насінин, г	56,2	57,8	2,4
Лузжистість, %	0,98	0,99	
Олійність, %	51,48	52,61	
Урожайність, т/га	2,31	2,90	0,15

Взаємодія ґрунтових мікроорганізмів, ексудатів соняшника та *Vitasergia svidasoma* (мікоризоутворювальний ендодіт, що сприяє формуванню збалансованого середовища мікробіоти ґрунту створюють сприятливі умови для росту та розвитку мікроорганізмів ризосферного ґрунту (рис. 4). Дослідження мікробіому ґрунту соняшника за оброблення насіння біологічним препаратом Міковітал у нормі внесення 1,5 л/т продемонстрували значне підвищення кількості мікроорганізмів у ризосферному ґрунті вже у фазі появи 2 трійчастого листка.

Чисельність амоніфікувальних мікроорганізмів, які мінералізують азотовмісні органічні речовини збільшувалася, і у фазі трійчастого листка їх кількість перевищувала контрольний зразок у 1,3 раза, а у фазі бутонізації – вже у 19,2 раза, що виявляє переважання процесів деструкції над синтезом органічної речовини в агроценозі соняшника. Слід відмітити, що у

фазі цвітіння спостерігали деяке зменшення кількості амоніфікувальних бактерій, проте переважання їх кількості порівняно з контролем сягало – 3,7 раза.

Чисельність мікроорганізмів, що здатні засвоювати мінеральний азот і, у такий спосіб, брати участь у розкладі рослинних і тваринних решток у ґрунті, а також у процесах мінералізації гумусу, збільшувалася порівняно з контролем у фазі появи 2 трійчастого листка і становила 3,75 млн КУО г/ґрунту проти контролю (0,8 млн КУО г/ґрунту). У фазі цвітіння ці мікроорганізми за внесення біологічного препарату Міковітал досягли кількості у 17,2 млн КУО г/ґрунту порівняно з контролем (10,4 млн КУО г/ґрунту).

Подібну тенденцію відмічено і у розвитку стрептоміцетів, які активно беруть участь у синтезі біологічно активних речовин гумусу та свідчать про дієвість ґрунтової екосистеми. Так, у період появи 2 пари трійчастого листка їх кількість порівняно

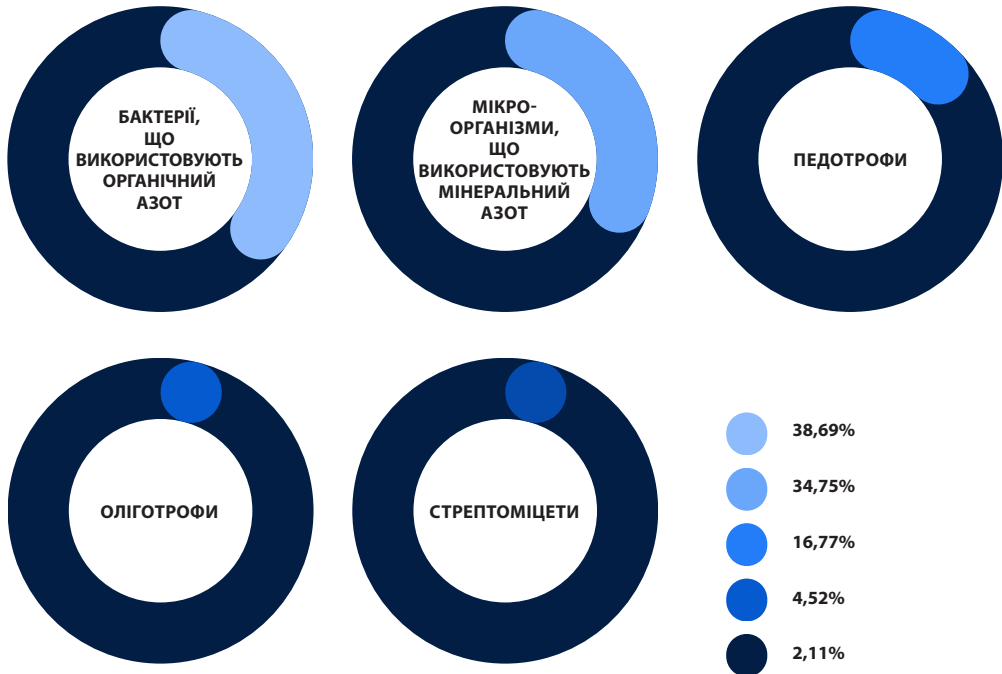


Рис. 4. Вплив препарату Міковітал на ґрунтову біоту за вирощування соняшника

з контролем перевищувала більш ніж у 4,1 раза, тоді як у період бутонізації та цвітіння – у 1,7 та 1,9 раза. Такі дані доводять, що внесення біологічного препарату Міковітал на основі мікоризоутворювального гриба *Vitaseorgia svidasoma* створює сприятливі умови для стрептоміцетів.

У процесі вегетації рослин сояшника спостерігалось поступове збільшення вмісту оліготрофних мікроорганізмів у ґрунті. Чим пізніший етап онтогенезу, тим численніша оліготрофна група мікроорганізмів у мікробіоценозі, функція якої полягає у завершенні мінералізаційних процесів. Максимальну кількість оліготрофів відзначали у фазі бутонізації та цвітіння (13,5 і 13,7 млн КУО г/ґрунту). Ця трофічна група мікроорганізмів відноситься до К-стратегів і завершує мінералізацію органічних сполук в екосистемах.

Окремо слід відобразити кількість мікроміцетів ґрунту (рис. 5), оскільки закономірно, що внесення мікоризоутворювального препарату на основі гриба *Vitaseorgia svidasoma* сприятиме збільшенню останніх у ґрунті. Дослідженнями підтверджено таку взаємозалежність ($R=0,98$) та встановлено, що кількість мікроміцетів підвищувалася в понад 35–100 разів залежно від фази розвитку сояшника. До того ж варто наголосити, що за результатами досліджень, виявлено, що в контрольних зразках ґрунту серед видового складу мікобіому переважали *Alternaria* (з частотою трапляння – 63,5%), *Aspergillus* (41,8), *Penicillium* (29,4) та *Fusarium* (17,5%). Переважання фітопатогенних мікоміцетів у ризосферному ґрунті сояшника засвідчує порушення збалансованості між сапротрофними і патогенними видами (Туров-

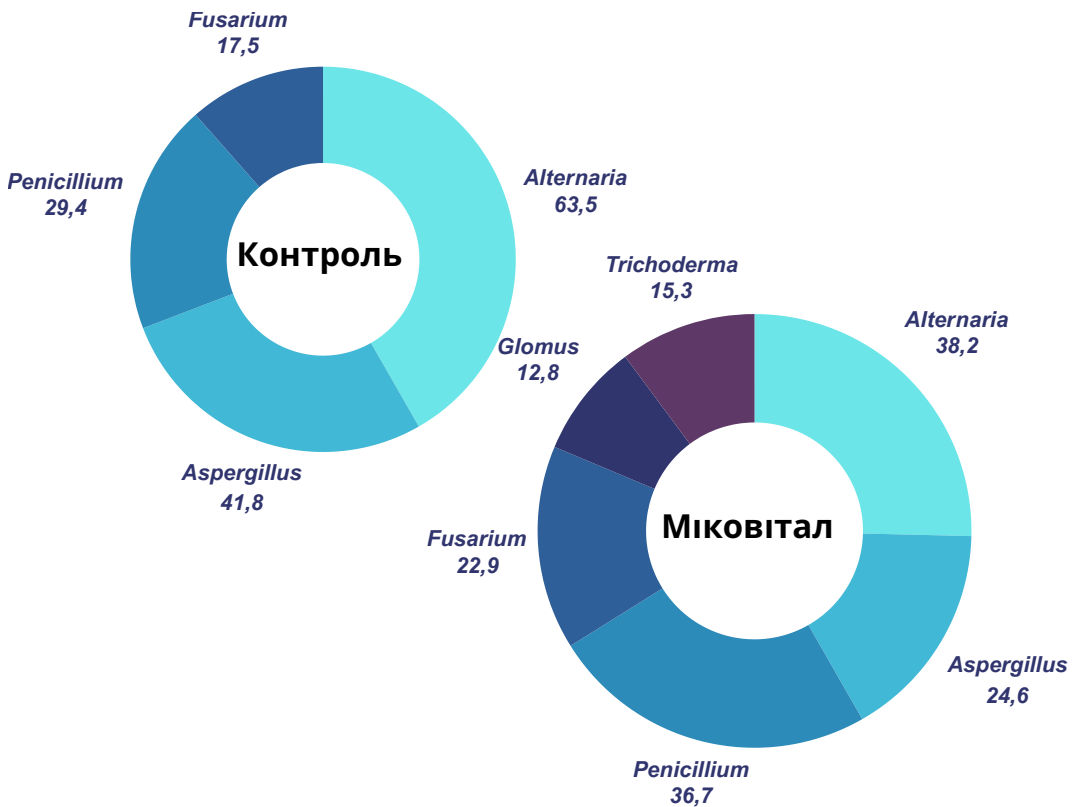


Рис. 5. Вплив Міковіталу на мікобіоту ризосферного ґрунту сояшника

нік, 2021), що зумовлює біологічне забруднення агроценозів шляхом накопичення інфекційних елементів та токсинів.

Натомість внесення мікоризоутворювального мікроміцету сприяло трансформації структури комплексу мікоміцетів та привело до змін у домінуючих видах останніх. Зокрема, після обробки насіння соняшника біологічним препаратом Міковітал було відзначено зменшення частоти трапляння мікроміцетів роду *Alternaria* до 38,2% та *Aspergillus* до 24,6%. Однак відбулося збільшення частоти трапляння видів роду *Penicillium* до 36,7% та *Fusarium* до 22,9%. Окрім того, у зразках ґрунту, оброблених мікоризоутворювальним грибом, було виявлено появу представників родів грибів *Trichoderma* (з частотою трапляння 15,3%) та *Glomus* (12,8%), які не були зафіксовані у контрольних зразках. Отримані результати доводять те, що застосування мікоризоутворювальних грибів може бути ефективним засобом для підвищення біорізноманіття ґрунту, що, своєю чергою, позитивно впливає на розвиток рослин та врожайність.

Дослідження спрямованості мікробіологічних процесів у ґрунті (табл. 3) дало можливість здійснити більш глибокий аналіз змін у структурі ґрунтово-біотичного

комплексу, які відбувалися за внесення у ґрунт біологічного препарату на основі мікоризоутворювального гриба *Vitasergia svidasoma*.

Підвищення показника педотрофності ($K_{\text{пед.}} \approx 0,4$) свідчить про збільшення інтенсивності розкладу органічної речовини ґрунту, зокрема гумусових сполук, а посилення оліготрофності ($K_{\text{ол.}} \approx 0,3$) ґрунту вказує на зниження вмісту у ґрунті поживних речовин. Зокрема слід відзначити середню забезпеченість ґрунтової мікробіоти елементами живлення у всіх варіантах досліджуваної вегетації соняшника та формування оптимальних умов для функціонування мікробіоти ґрунтового комплексу та, відповідно, її активність у трансформації вуглеводів ґрунту і зв'язування вільного азоту свідчить про переважання у ґрунті процесів деструкції над синтезом, а також спостерігається збільшення використання мікроорганізмами мінеральних форм азоту в своєму життєвому циклі.

У контексті дослідження необхідно підкреслити, що коефіцієнт мінералізації у контрольних зразках перевищував одиницю, що вказує на переважання процесів деструкції над процесами синтезу. Це явище є типовим для умов, де домінують мікробні процеси розкладання органічних речовин

Таблиця 3. Екологічні коефіцієнти ґрунту за внесення мікоризоутворювального гриба *Vitasergia svidasoma* у посівах соняшника

Варіант	Коефіцієнт			
	мінералізації / імобілізації ($K_{\text{мін.}}$)	педотрофності ($K_{\text{пед.}}$)	оліготрофності ($K_{\text{ол.}}$)	трансформації органічної речовини ($K_{\text{гор.}}$)
<i>ВВСН 10–19 (поява 2 трійчастого листка)</i>				
Контроль	0,38	0,3	0,29	8,1
Міковітал, 1,5 л/т	0,39	0,6	0,45	10,3
<i>ВВСН 51–59 (бутонізації)</i>				
Контроль	1,67	0,1	0,31	9,8
Міковітал, 1,5 л/т	0,73	0,2	0,31	17,9
<i>ВВСН 61–69 (цвітіння)</i>				
Контроль	1,67	0,2	0,31	9,7
Міковітал, 1,5 л/т	0,74	0,5	0,34	15,4

із формуванням мінеральних сполук, що відбивається на збільшенні кількості вивільнених різних хімічних елементів. Однак застосування біологічного препарату на основі грибів, спрямованого на оптимізацію процесів біотрансформації органічних речовин, істотно вплинуло на динаміку процесів у ґрунтовій системі. Особливо відзначено, що вже на стадії бутонізації культури рослин з'явилися очевидні ознаки зміни тенденції у напрямі посилення синтезу важливих для рослин елементів. Ця тенденція спостерігалася впродовж усього періоду вегетації, що засвідчило стабільність та ефективність біологічного препарату в умовах експерименту.

Біологічні властивості ґрунтів безпосередньо залежать від біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів та функціонування різних еколого-трофічних груп [26; 27]. Одним із ключових функціональних параметрів, що відображає активність ґрунтової мікробіоти, є інтенсивність виділення діоксиду карбону.

Визначення активності процесу емісії діоксиду карбону (рис. 6) з ґрунту за

застосування біопрепарату Міковітал на посівах соняшника на різних етапах його росту та розвитку (фаза початку 2 трійчастого листка, фаза бутонізації, фаза цвітіння) вказує на складний взаємозв'язок між рослинами, ґрунтом та мікробіологічними процесами. На основі аналізу даних, отриманих у цьому дослідженні, встановлено, що інтенсивність емісії діоксиду карбону зростала за застосування біопрепарату Міковітал. Наприклад, на етапі початку 2 трійчастого листка інтенсивність емісії CO_2 у зразках із Міковіталом перевищувала значення контрольних груп. Це наголошує про підвищену активність ґрунтової мікробної популяції, що здатна активно переробляти органічні речовини, доступні для них завдяки дії біопрепарату. На етапі бутонізації та цвітіння також спостерігалася збільшення інтенсивності емісії CO_2 у зразках з Міковіталом порівняно з контролем, що зумовлено підвищеним постачанням органічних речовин у ґрунті через стимуляцію росту рослин або з покращанням умов для мікробного розкладання органічної речовини.

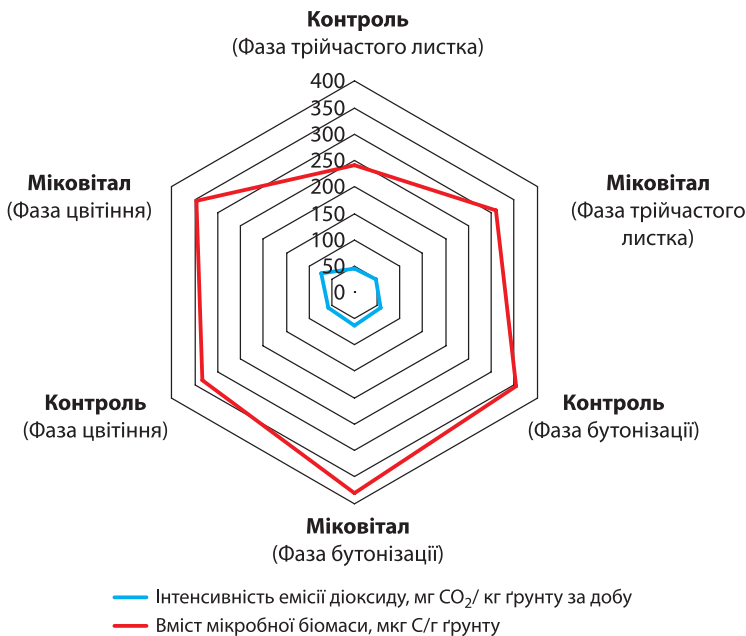


Рис. 6. Вплив Міковіталу на показники біологічної активності мікроорганізмів ґрунту

Ще одним ключовим показником збереження ґрунтової родючості і стійкості екосистем є вміст мікробної біомаси. Встановлено, що у контрольних зразках вміст мікробної біомаси з початкового рівня 240,61 мкг С/г ґрунту підвищився до 344,72 мкг С/г ґрунту у фазі цвітіння. Цей приріст вказує на природні процеси біодеградації та активності мікроорганізмів у ґрунті під впливом органічного матеріалу, що надходить від рослин та інших джерел. За оброблення насіння соняшника біологічним препаратом Міковітал спостерігався збільшений вміст мікробної біомаси зі значення 308,68 мкг С/г ґрунту на початковому етапі до 380,75 мкг С/г ґрунту у фазі цвітіння, що вказує про чіткий тренд до посилення активності мікробної біоти внаслідок впливу біопрепарату Міковітал. Високий рівень мікробної біомаси може сприяти підтримці родючості ґрунту та забезпеченню необхідних поживних речовин для рослин.

ВИСНОВКИ

Дослідження впливу біологічного препарату Міковітал на основі мікоризоутворювальних грибів у технології вирощування соняшника (*Helianthus L.*) засвідчило позитивний вплив на ріст, розвиток та продуктивність рослин. Доведено, що застосування Міковіталу призвело до збільшення врожайності соняшника від 2,31 т/га

(контроль) до 2,90 т/га, що є статистично значущим приростом за покращання якісних показників насіння (маси 1000 насінин та олійності). До того ж препарат сприяв посиленню площі активних коренів на всіх етапах розвитку рослин, зокрема, у фазі бутонізації площа активних коренів збільшилася на 5,2 см², а у фазі цвітіння – на 4,9 см², що забезпечило рослинам ефективніше поглинання води та поживних речовин. Встановлено, що підвищення листкової поверхні (у фазі появи 2 трійчастого листка на 0,5 дм², у фазі бутонізації – на 1,5 дм², а у фазі цвітіння – на 2,1 дм²) сприяло покращанню фотосинтетичної активності та загальної продуктивності рослин.

Препарат сприяв збільшенню чисельності мікроорганізмів у ґрунті, як-от амоніфікувальні бактерії та стрептоміцети, а також появи представників мікроміцетів, таких як *Trichoderma* та *Glomus*, що позитивно вплинуло на біорізноманіття та сприяло поліпшенню забезпечення рослин поживними речовинами. Загалом, застосування біологічного препарату Міковітал на основі мікоризоутворювальних грибів виявилось ефективним засобом для покращання росту, розвитку та врожайності соняшника, забезпечення стабільності рослин у стресових умовах, а також оптимізації ґрунтового мікробіому.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дем'янюк О.С., Матусевич Г.Д., Мазур С.О. та ін. Пшениця, кукурудза та соняшник — основні культури українського експорту. *Землеробство та рослинництво: теорія і практика*. 2023. Вип. 4 (10). С. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.54651/agri.2023.04.05>.
2. Wahab A., Muhammad M., Munir A. et al. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants (Basel)*. 2023. № 12 (17). P. 3102. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12173102>.
3. Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N. et al. World's soils are under threat. *Soil*. 2016. № 2. P. 79–82. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>.
4. Dewitte O., Jones A., Spaargaren O. et al. Harmonisation of the soil map of Africa at the continental scale. *Geoderma*. 2013. № 211. P. 138–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.Geoderma.2013.07.007>.
5. Fall A.F., Nakabonge G., Ssekandi J. et al. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil. *Front. Fungal Biol.* 2022. № 3. P. 723892. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892>.
6. Dal Cortivo C., Ferrari M., Visioli G. et al. Effects of seed-applied biofertilizers on rhizosphere biodiversity and growth of common wheat (*Triticum aestivum L.*) in the field. *Front. Plant Sci.* 2020. Vol. 11. P. 72. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00072>.
7. Anderson R., Keshwani D., Guru A. et al. An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models. *Environ. Model. Softw.* 2018. № 108. P. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.004>.

8. Оліферчук В.П., Федорович Д.В. Вплив мікоризного гриба *Tuber melanosporum* на біорізноманіття мікроміцетів ризосфери та ріст і продуктивність фундука. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. № 31 (2). С. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310204>.
9. Bonfante P. and Desirò A. Arbuscular mycorrhizas: The lives of beneficial fungi and their plant hosts. *Principles of Plant-Microbe Interactions* / Ed. by B. Lugtenberg. Cham: Springer. 2015. P. 235–245. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_25.
10. Kaiser C., Kilburn M.R., Clode P.L. et al. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs. direct root exudation. *New Phytol.* 2015. № 205. P. 1537–1551. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13138>.
11. Luginbuehl L.H., Menard G.N., Kurup S. et al. Fatty acids in arbuscular mycorrhizal fungi are synthesized by the host plant. *Science*. 2017. № 356. P. 1175–1178. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aan0081>.
12. Keymer A., Pimprikar P., Wewer V. et al. Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *ELife*. 2017. № 6. P. 29107. DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.29107.002>.
13. Jamiołkowska A., Ksiezniak A., Gałazka A. et al. Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. *Int. Agrophys.* 2020. № 32. P. 133. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0090>.
14. Parihar M., Rakshit A., Meena V.S. et al. The potential of arbuscular mycorrhizal fungi in C cycling: a review. *Arch. Microbiol.* 2020. № 202. P. 581–1596. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01915-x>.
15. Wang Z., Li Y., Li T., Zhao D. and Liao Y. Conservation tillage decreases selection pressure on community assembly in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal fungi. *Sci. Tot. Environ.* 2020. № 710. P. 136326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136326>.
16. El-maghraby F.M., Shaker E.M., Elbagory M., Omara A.E.-D and Khalifa T.H. The synergistic impact of arbuscular mycorrhizal fungi and compost tea to enhance bacterial community and improve crop productivity under saline-sodic condition. *Plants*. 2024. № 13. P. 629. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13050629>.
17. Augé R. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*. 2001. № 11. P. 3–42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s005720100097>.
18. Sylvia D.M., Fuhrmann J.J., Hartel P.G. and Zuberer D.A. Principles and Applications of Soil Microbiology. Pearson Education, 2005.
19. Parniske M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*. 2008. № 6 (10). P. 763–775. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>.
20. Smith F.A. and Smith S.E. How useful is the mutualism-parasitism continuum of arbuscular mycorrhizal functioning? *Plant and Soil*. 2011. № 363 (1–2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1583-y>.
21. Jeffries P., Gianinazzi S., Perotto S., Turnau K. and Barea J.M. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*. 2003. № 37. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0546-5>.
22. Smith S.E. and Read D.J. Mycorrhizal Symbiosis. *Academic Press*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>.
23. Mahdi S., Hassan G., Samoon S. et al. Bio-fertilizers in organic agriculture. *Journal of Phytology*. 2010. № 2. С. 42–54.
24. Андріюк К.І., Іутинська Г.О., Антипчук А.Ф. Функціонування мікробних угруповань в умовах антропогенного навантаження. Київ: Обереги, 2001. 240 с.
25. Войцехівська О.В., Капустян А.В., Косик О.І. та ін. Фізіологія рослин: практикум / за ред. Т.В. Паршикової. Луцьк: Терен, 2010. 420 с.
26. Симочко Л.Ю., Дем'янюк О.С. Мікробіом ґрунту культурних рослин за різних агротехнологій. *Агроєкологічний журнал*. 2018. № 2. С. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2018.157862>.
27. Demyanyuk O., Symochko L. and Shatsman D. Structure and dynamics of soil microbial communities of natural and transformed ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management (EREM)*. 2020. № 76 (4). P. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.4.23508>.

REFERENCES

1. Demianiuk, O.S., Matusевич, H.D., Mazur, S.O. et al. (2023). Pshenytsia, kukurudza ta soniashnyk — osnovni kultury ukrainskoho eksportu [Wheat, corn, and sunflower are the main crops of Ukrainian exports]. *Zemlerobstvo ta roslynnystvo: teoriia i praktyka — Agriculture and Crop Production: Theory and Practice*, 4 (10), 41–50. DOI: <https://doi.org/10.54651/agri.2023.04.05> [in Ukrainian].
2. Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A. et al. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants (Basel)*, 12 (17), 3102. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12173102> [in English].
3. Montanarella, L., Pennock, D.J., McKenzie, N. et al. (2016). World's soils are under threat. *Soil*, 2, 79–82. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016> [in English].
4. Dewitte, O., Jones, A., Spaargaren, O. et al. (2013). Harmonisation of the soil map of Africa at the continental scale. *Geoderma*, 211, 138–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.007> [in English].
5. Fall, A.F., Nakabonge, G., Ssekandi, J. et al. (2022). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil. *Front. Fungal Biol*, 3, 723892. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892> [in English].

6. Dal Cortivo, C., Ferrari, M., Visioli, G. et al. (2020). Effects of seed-applied biofertilizers on rhizosphere biodiversity and growth of common wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field. *Front. Plant Sci.*, 11, 72. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00072> [in English].
7. Anderson, R., Keshwani, D., Guru, A. et al. (2018). An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models. *Environ. Model. Softw.*, 108, 40–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.004> [in English].
8. Oliferchuk, V.P. & Fedorowych, D.V. (2021). Vplyv mikoryznoho hryba *Tuber melanosporum* na biorizonomanittia mikromitsetiv ryzosfery ta rist i produktyvnist funduka [The Influence of the Mycorrhizal Fungus *Tuber melanosporum* on the Biodiversity of Rhizosphere Micromycetes and the Growth and Productivity of Hazelnut]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine*, 31 (2), 28–34. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310204> [in Ukrainian].
9. Bonfante, P., Desirò, A. & Lugtenberg, B. (Ed.). (2015). Arbuscular mycorrhizas: The lives of beneficial fungi and their plant hosts. *Principles of Plant-Microbe Interactions*. (pp. 235–245). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_25 [in English].
10. Kaiser, C., Kilburn, M.R., Clode, P.L. et al. (2015). Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs. direct root exudation. *New Phytol.*, 205, 1537–1551. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13138> [in English].
11. Luginbuehl, L.H., Menard, G.N., Kurup, S. et al. (2017). Fatty acids in arbuscular mycorrhizal fungi are synthesized by the host plant. *Science*, 356, 1175–1178. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aan0081> [in English].
12. Keymer, A., Pimprikar, P., Wewer, V. et al. (2017). Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *ELife*, 6, 29107. DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.29107.002> [in English].
13. Jamiołkowska, A., Ksiezniak, A., Gałazka, A. et al. (2018). Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. *Int. Agrophys.*, 32, 133. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0090> [in English].
14. Parihar, M., Rakshit, A., Meena, V.S. et al. (2020). The potential of arbuscular mycorrhizal fungi in C cycling: a review. *Arch. Microbiol.*, 202, 581–1596. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01915-x> [in English].
15. Wang, Z., Li, Y., Li, T., Zhao, D. & Liao, Y. (2020). Conservation tillage decreases selection pressure on community assembly in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal fungi. *Sci. Tot. Environ.*, 710, 136326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136326> [in English].
16. El-maghraby, F.M., Shaker, E.M., Elbagory, M., Omara, A.E.-D. & Khalifa, T.H. (2024). The synergistic impact of arbuscular mycorrhizal fungi and compost tea to enhance bacterial community and improve crop productivity under saline-sodic condition. *Plants*, 13, 629. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13050629> [in English].
17. Augé, R. (2021). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11, 3–42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s005720100097> [in English].
18. Sylvia, D.M., Fuhrmann, J.J., Hartel, P.G. & Zuberer, D.A. (2005). Principles and Applications of Soil Microbiology. Pearson Education [in English].
19. Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6 (10), 763–775. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987> [in English].
20. Smith, F.A. & Smith, S.E. (2011). How useful is the mutualism-parasitism continuum of arbuscular mycorrhizal functioning? *Plant and Soil*, 363 (1–2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1583-y> [in English].
21. Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K. & Barea, J.M. (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 37, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0546-5> [in English].
22. Smith, S.E. & Read, D.J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6> [in English].
23. Mahdi, S., Hassan, G., Samoon, S. et al. (2010). Biofertilizers in organic agriculture. *Journal of Phytology*, 2, 42–54 [in English].
24. Andriiuk, K.I., Iutynska, H.O. & Antypchuk, A.F. (2001). *Funktsionuvannia mikrobnykh uhrupovan v umovakh antropohennoho navantazhennia [Functioning of Microbial Communities under Anthropogenic Load]*. Kyiv [in Ukrainian].
25. Voitsekhivska, O.V., Kapustian, A.V., Kosyk, O.I. & Parshykova, T.V. (Ed.). *Fiziolohiia roslyn [Plant Physiology]*. Lutsk: Teren [in Ukrainian].
26. Symochko, L.Yu. & Demianiuk, O.S. (2018). Mikrobiom gruntu kulturnykh roslyn za riznykh ahrotekhnolohii [Soil Microbiome of Cultivated Plants under Different Agrotechnologies]. *Ahroekolohichniy zhurnal – Agroecological Journal*, 2, 87–93. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2018.157862> [in Ukrainian].
27. Demyanyuk, O., Symochko, L. & Shatsman, D. (2020). Structure and dynamics of soil microbial communities of natural and transformed ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management (EREM)*, 76 (4), 97–105. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.4.23508> [in English].

Стаття надійшла до редакції журналу 24.06.2024