

^{1, 2}Я.В. ЧАБАНЮК, доктор сільськогосподарських наук

²О.В. ЖМУР

¹ТОВ «Інститут Агробіології», б-р. Вацлава Гавела, 4, корп. 45, м. Київ, 03067, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

ВПЛИВ ГРИБІВ-МІКОРИЗОУТВОРЮВАЧІВ І БАКТЕРІАЛЬНИХ ЕНДОСІМБІОНТІВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ МАЛИНИ В УМОВАХ ВОДНОГО СТРЕСУ

Мета. Дослідження впливу полікомпонентної багатфункціональної інокуляції на основі мікоризоутворюючих грибів (*Trichoderma* spp., *Glomus* sp.) і бактерій (*Agrobacterium*) на ростові процеси та формування продуктивності рослин малини (*Rubus idaeus* L.) за абіотичних стрес-факторів (посуха). **Методи.** Дослідження проводили в умовах відкритого ґрунту впродовж 2023—2025 рр. на дослідному полігоні ТОВ «Інститут Агробіології» (с. Високе, Брусилівський р-н, Житомирська обл.). У дослідних насадженнях вирощували сорт малини Вогник української селекції. Схема досліджень передбачала застосування комбінантної інокуляції штамами грибів із родів *Trichoderma* spp. та *Glomus* sp., а також бактеріями роду *Agrobacterium* за внесення їх у ризосферу рослин шляхом фертигації за різних фонів ґрунтового зволоження — достатнього ($80 \pm 5\%$ FC), дефіцитного — помірна посуха (50% FC) та сильної посухи (30% FC). Використовували загальнонаукові та спеціальні методи: польовий, лабораторний та статистичний. Штами грибів (*Trichoderma viride* еко/103, *T. harzianum* еко/101 та *Glomus* sp. еко/104) отримано із колекції культур ТОВ «Інститут Агробіології», бактерії *A. radiobacter* виділено безпосередньо авторами. **Результати.** Польові випробування інокуляції рослин малини грибами *Trichoderma* spp., *Glomus* sp. та бактеріальними симбіонтами *Agrobacterium* показали покращення їхнього загального стану, підвищення стресостійкості рослин за дії ґрунтової посухи — знижує температуру листової поверхні на 5,8—11,2%; сприяє активізації фотосинтетичної активності — збільшує вміст суми хлорофілів «а» та «b» на 16,6—60,8% та підвищує продуктивність (маса плодів з куща зростає у 1,08—1,27 раза, маса однієї ягоди зростає на 13,5—33,3%) і кінцеву врожайність культури на 8,8—16,6% за різних

умов дефіциту зволоження. **Висновки.** Використання комбінованих інокуляцій консорціумів грибів-мікоризоутворювачів і бактеріальних ендосимбіонтів — *Trichoderma* spp., *Glomus* sp. та *Agrobacterium radiobacter* має позитивний характер впливу різного ступеня вираженості щодо параметрів продуктивності малини *Rubus idaeus* L. на тлі контролю (без обробки) за різних умов дефіциту зволоження. Даний симбіотичний ефект тернарних мікробних консорціумів з ризосферою рослин *R. idaeus* L. зумовлений як синергічною дією мікроорганізмів у полікомпонентній системі, так і їхнім взаємним впливом один на одного. Дані мають практичне значення для підвищення ефективності вирощування малини у відкритому ґрунті.

Trichoderma; Glomus; Agrobacterium; Rubus; мікоризація; врожайність

В умовах зміни клімату та зростання впливу несприятливих агроекологічних чинників, що обмежують ріст і розвиток культурних рослин, особливого значення набуває впровадження агроекологічного підходу в рослинництві. Його реалізація передбачає застосування принципів адаптивного рослинництва, зокрема добір сортів, здатних формувати стабільну врожайність за лімітуючих умов, та використання мікроорганізмів (грибів, бактерій), які сприяють оптимізації умов вирощування культури. Такий підхід є надзвичайно актуальним для сучасного аграрного сектору України.

Рід *Rubus* L. (Rosaceae) об'єднує тисячі видів ожини та малини, які культивуються в усьому світі. Упродовж останніх років відзначається зростання глобального попиту на свіжі ягоди представників роду *Rubus* [1]. Малина звичайна (*Rubus idaeus* L.) є економічно значущою культурою в Україні, її вирощування становить вагомий сектор національного аграрного виробництва, причому останнім часом особливого попиту набуває малина, вирощена за принципами органічного землеробства [2]. Для забезпечення стабільної продуктивності цієї культури необхідним є впровадження оптимізованих систем живлення рослин.

Зокрема, мікоризні гриби відіграють ключову роль у формуванні поживного статусу молодих рослин на стадії розсадника та під час їх подальшої акліматизації. Крім того, вони виконують важливу біозахисну функцію, підвищуючи стійкість рослин до ґрунтових грибкових патогенів, оскільки низку фітопатогенних грибів розглядають як основних чинників розвитку явища «втоми ґрунту», характерного, зокрема, для плодово-ягідних насаджень [3].

Мікоризоутворюючі гриби — арбускулярні мікоризні гриби роду *Glomus* Tul. & C. Tul. (1845) (Glomeromycota) та сапрофітні ґрунтові гриби роду *Trichoderma* Pers. (1801) (Ascomycota) — розглядаються як перспективні агенти біотизації корневих систем ягідних культур [4,

5]. Їхня ефективність зумовлена здатністю покращувати мінеральне живлення рослин, підвищувати толерантність до абіотичних і біотичних стресових чинників, а також стимулювати ріст і розвиток кореневої системи [6, 7]. Відомо, що у сучасних біотехнологічних підходах перевага надається використанню багатокомпонентних інокулянтів, які містять комплекси ефективних мікроорганізмів, а не окремі штами грибів чи бактерій. Спільна інокуляція мікоризоутворюючими грибами та бактеріями здатна істотно стимулювати ріст і розвиток сільськогосподарських культур, зокрема ягідних рослин [8]. Водночас механізми, що лежать в основі цих взаємодій, залишаються недостатньо з'ясованими.

Одним із найбільш відомих та широко застосовуваних ефективних мікроорганізмів у складі біоінокулянтів є азотфіксуючі бактерії (роди *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*), яких використовують для вирощування бобових, злакових та овочевих культур, а також фосформобілізуєчі бактерії, що сприяють перетворенню важкорозчинних фосфатів ґрунту в легкорозчинні форми, більш доступні для рослин (роди *Bacillus*, *Pseudomonas*) [9, 10].

Нині менш поширеним у сільськогосподарському виробництві є застосування бактерій роду *Agrobacterium* Conn, 1942 (родина Rhizobiaceae), що належать до групи α -протеобактерій, філогенетично споріднених із ризобіями. Серед *Agrobacterium* spp. трапляються як патогенні види, так і авірулентні штами. Найбільш детально вивченим представником з цього роду є *A. tumefaciens* (Smith et Townsend, 1907) Conn, 1942 — збудник бактеріального раку, неопластичного захворювання, поширеного серед широкого спектра рослин-хазяїв [11].

У цій роботі розглянуто вид *Agrobacterium radiobacter* (Beijerinck and van Delden, 1902) Conn, 1942 — авірулентний родич *A. tumefaciens*, який не містить пухлинно-індукуючої (Ti) плазміди та не викликає пухлинних захворювань у рослин [12]. Натомість цей вид характеризується вираженими антагоністичними властивостями до патогенних штамів *Agrobacterium*, що зумовлено конкуренцією за місця прикріплення на поверхні рослин, здатністю до утворення біоплівки і синтезом антимікробних метаболітів. Завдяки цим характеристикам *A. radiobacter* вважається перспективним агентом біологічного контролю, здатним ефективно пригнічувати розвиток бактеріального раку та інших хвороб [13].

Використання біоінокулянтів має важливе значення для підвищення стійкості рослин до абіотичних стресових чинників, зокрема посухи, засолення ґрунтів та впливу високих температур. Даний ефект зумовлений здатністю біопрепаратів покращувати поглинання води й елементів мінерального живлення, що, у свою чергу, сприяє підвищенню адаптивного потенціалу рослин за несприятливих умов

середовища [14]. У випадку *Rubus idaeus* L., потенціал використання мікоризоутворюючих грибів, а також бактеріальних симбіонтів для підвищення ефективності вирощування, особливо в умовах відкритого ґрунту, а не в контрольованих умовах закритого ґрунту, ще не повністю реалізований на локальному рівні, що й визначило мету дослідження.

Мета роботи — дослідити характер впливу інокуляції грибами-мікоризоутворювачами (*Trichoderma viride* Persoon, 1794; *T. harzianum* Rifai, 1969; *Glomus* sp. Tul. & C. Tul. 1845) та бактеріями *Agrobacterium radiobacter* і їхніми комбінаціями на загальний стан та параметри продуктивності рослин малини європейської *Rubus idaeus* L. (Rosaceae) за різних фонів зволоження в умовах відкритого ґрунту.

Матеріали і методи. Дослідження проводили у польових умовах впродовж 2023—2025 рр., на дослідному полігоні ТОВ «Інститут Агробіології» (с. Високе, Брусилівський р-н, Житомирська обл.), у межах зони Полісся з «лісостеповими» умовами. У дослідженні використано сорт малини універсального призначення Вогник (оригінований — Інститут помології ім. Л.П. Симиренка Національної академії аграрних наук України), який внесено до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні [15].

Сорт малини Вогник відзначається високою продуктивністю — урожайність становить 180,0 ц/га, середня маса ягід — 3,6 г, а середній урожай з одного куща — 4,1 кг. Плоди характеризуються вмістом вітаміну С — 20,0%, загальних цукрів — 10,9%, сухих речовин — 16,0%, при загальній кислотності 1,4%. Рослини мають високу екологічну пластичність і добре адаптуються до різних умов вирощування. Стійкість до посухи оцінюється у 7 балів за дев'ятибальною шкалою. Високий рівень стійкості до грибних хвороб відзначено щодо антракнозу, білої плямистості та іржі (по 9 балів), тоді як до пурпурової плямистості — 7 балів. За стійкістю до шкідників сорт проявляє добру толерантність: ураження малиновим довгоносом та попелицею не перевищує 7 балів. Зимостійкість дуже висока (9 балів); ступінь підмерзання та вимерзання квіткових бруньок мінімальні — по 1 балу. Сорт має універсальний напрям використання, характеризується доброю транспортабельністю (7 балів) і середніми строками достигання. Дегустаційна оцінка свіжих ягід становить 8,5 бала. За географічними та зональними умовами сорт рекомендовано для вирощування у зонах Лісостепу та Полісся.

До проведення дослідів здійснено аналізи основних показників фізичного стану та хімічних властивостей ґрунту. Аналізи виконували на базі лабораторії ТОВ «Інститут Агробіології». Проби ґрунту відбирали й готували до аналізів згідно з ДСТУ ISO 11465-2001 [16]. Ґрунт дерново-підзолистий супіщаний, вміст гумусу — 1,49%, глибина

гумусового горизонту — 20—22 см. Гранулометричний склад ґрунту: фізична глина — 10—20%, мул — 7%. Щільність ґрунту — 1,51 г/см³. Максимально можливий запас продуктивної вологи в 0—100 см — 175 мм. Гідролітична кислотність ґрунту становить 1,55 мг-екв./100 г. Показник рН сольовий — 5,8. Сума увібраних основ (Са+Мg) — 1,6 мг-екв. (100 г).

Дослідження передбачало використання штамів грибів-мікоризоутворювачів та бактерій, що підтримують утворення мікоризи та ризосфери рослин, які було внесено в прикореневу зону рослин малини у період вегетації за допомогою системи краплинного зрошення, шляхом фертигації двічі з інтервалом у кілька днів. Під час першого внесення використали дозу 0,7 л/га, а під час другого — 0,5 л/га. Штами грибів — *Trichoderma viride* еко/103, *T. harzianum* еко/101 та *Glomus* sp. еко/104 — отримали із колекції культур ТОВ «Інститут Агробіології» (діючі інгредієнти препаратів); бактерії *A. radiobacter* ізольовано безпосередньо авторами. Загальна кількість життєздатних клітин $(1,0\text{--}1,5) \times 10^8$ КУО/мл.

Схема польового досліду включала такі варіанти: 1). Контроль (без внесення мікроорганізмів); 2). Інокуляція *T. viride* + *T. harzianum* + *Glomus* sp.; 3). Інокуляція *T. viride* + *Glomus* sp. + *A. radiobacter*; 4). Інокуляція *T. harzianum* + *Glomus* sp. + *A. radiobacter*. Варіанти досліду розміщували методом рендомізованих блоків у чотириразовій повторності. Розмір ділянок — 10 облікових рослин у рядку. Упродовж усіх років вегетації проводили регулярні фенологічні спостереження і оцінку стану рослин. Визначали параметри продуктивності: урожайність, масу ягід з куща, середню масу ягоди. З фізіологічних показників фіксували кількість хлорофілу та температуру листя.

Розглянуто фактор водного режиму: оптимальний ($80 \pm 5\%$ FC); дефіцитний — помірна посуха ($50 \pm 5\%$) і сильна посуха ($30 \pm 5\%$ FC). Ґрунтову вологість контролювали за допомогою ґрунтового вологоміра Metrinco M142S на глибині 30 см і регулювали кратністю поливу та частотою періодів між поливами. Моніторинг вологості ґрунту здійснювали 3—4 рази на тиждень. Посуху створювали за два тижні до критичної фази цвітіння і тривала вона до збору врожаю, впродовж 3—4-х тижнів.

Оцінювали стан рослин у насадженнях візуально за шкалою життєздатності (0—10), де: 0 — не життєздатні рослини (не мають листя); 1 — рослини демонструють життєздатність на 10%; 2—4 — проміжні показники в межах від 20 до 40%; 5 — рослини демонструють життєздатність на 50%; 6—9 — проміжні показники від 60 до 90%; 10 — повна життєздатність (стандартна енергія росту для даної культури в нормальних умовах).

Оцінка температури листового апарату — це вимірювання темпе-

ратурних показників. Температура листя рослин є індикатором стресу, який був оцінений за допомогою пірометра.

Для визначення вмісту хлорофілу у листках рослин використовували класичний спектрофотометричний метод. Процедура включала екстрагування хлорофілів етиловим спиртом 96%, за яким слідувало визначення оптичної густини отриманого екстракту на спектрофотометрі T60 UV VIS, а також проведення відповідних розрахунків. Вміст хлорофілу *a* вимірювали за довжини хвилі $\lambda=665$ нм, а хлорофілу *b* — за $\lambda=649$ нм.

Біологічну урожайність культури визначали множенням густоти рослин (шт./га) на середню масу плодів з рослини в грамах та діленням на 1 000 000 для переведення в тонни на 1 га.

Статистичну обробку проводили методами описової та варіаційної статистики, застосовуючи програми обробки даних «IBM SPSS Statistics (v.23.0)» та «Microsoft Excel 2016». Аналіз тенденцій основних досліджуваних показників під впливом інокуляції у відповідних порівнюваних групах здійснювали за допомогою розрахунку U-критерія Манна-Уїтні. Позаяк обсяг вибірки $n>10$, гіпотези Манна-Уїтні були оцінені з використанням статистики z-показника і одиничного нормального розподілу, порогом статистичної значущості визнали загальноприйнятий рівень 5% (або при $p\leq 0,05$).

Результати та обговорення. Порівняльні польові дослідження свідчать, що інокуляція рослин *Rubus idaeus* L. мікоризоутворюючими грибами з родів *Trichoderma* spp., *Glomus* sp., а також бактеріями роду *Agrobacterium* сприяла достовірному покращенню стану рослин та фізіологічних показників надземної частини порівняно з контролем в умовах водного стресу (посухи). Зміни різного ступеня вираженості були зафіксовані як при окремому внесенні грибів-мікоризоутворювачів (*Trichoderma* spp., *Glomus* sp.), так і при комбінованому використанні із бактеріальними агентами (*Agrobacterium*) (табл. 1).

Після внесення грибів (Th + Tv + Gl) відбулось відповідне покращення загального стану рослин малини на 1—3 бали за різних умов дефіциту зволоження. Окомірно встановлено, що у варіантах із бактеріями (Tv/Th + Gl+ Ar) покращення загального стану рослин зросло на 3—4 бали.

Водночас встановлено, що усі варіанти інокуляцій мікроорганізмами знижували температуру листової поверхні малини. Як відомо, температура листя рослин є індикатором стресу, а тому була оцінена нами в рамках дослідження [17].

Середня температура поверхні листків у варіанті Th + Tv + Gl була нижчою відносно контролю і варіювала від 1,3% (оптимальне зволоження) до 5,8—8,3% залежно від фону дефіцитного зволоження. Також виявлено тенденцію до покращення вищезазначених показни-

**1. Стан рослин та фізіологічні показники надземної частини
рослин *R. idaeus* L. залежно від інокуляції та фону зволоження
(середнє за 2023—2025 рр.)**

№ з/п	Варіант досліджу	Стан рослин (шкала від 0 до 10)			Середня температура поверхні листків, (12:00) °C			Вміст хлорофілу (Σхл. _{a+b}), мг/г		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	Контроль	8	6	4	21,7	24,0	29,1	0,035	0,030	0,023
2	Th + Tv + Gl	9	8	7	21,4	22,0	27,4*	0,037	0,035	0,032*
3	Tv + Gl + Ag	10	9	7	20,7*	21,5*	26,5*	0,040*	0,038*	0,036*
4	Th + Gl+ Ag	10	10	8	20,0*#	21,3*#	26,0*#	0,043*#	0,040*#	0,037*
Примітка: *достовірна різниця між показниками варіантів порівняння «1» і «2»; 3; 4» (U-критерій Манна-Уїтні; p<0,05); #достовірна різниця між показниками варіантів порівняння «2» і «3; 4» (U-критерій Манна-Уїтні; p<0,05).										
Умовні позначення: I — оптимальний фон зволоження; II — помірна посуха; III — сильна посуха; Tv — <i>Trichoderma viride</i> ; Th — <i>Trichoderma harzianum</i> ; Gl — <i>Glomus</i> sp.; Ag — <i>Agrobacterium radiobacter</i> ; Σхл. _{a+b} — сума хлорофілу фракцій «a» та «b».										

ків у варіантах Tv + Gl + Ag та Th + Gl + Ag на фоні помірного та сильного дефіциту зволоження, середня температура поверхні листків знизилась на 8,9—10,4% та 10,6—11,2% відповідно, у той час як при оптимальному вона становила 4,7% та 7,8% (табл. 1).

Також дослідженнями охарактеризовано ступінь розвитку фотосинтетичного апарату дослідних рослин малини із врахуванням вмісту хлорофілів у надземних органах рослини, який побічно характеризує фотосинтетичну активність. Загальновідомо, що значний вплив на біосинтез хлорофілу мають освітлення, температура, мінеральне живлення, обробка рослин фізіологічно активними речовинами, вік листків тощо [18].

Узагальнення наведених даних свідчить про те, що збільшення вмісту хлорофілу при застосуванні інокуляції відбувалося в основному за рахунок фракції «a». У результаті внесення композиції грибів Th + Tv + Gl відбулось підвищення вмісту хлорофілів сумарно на 5,7—39,1% (порівняно з відповідним контрольним варіантом), залежно від фону зволоження (табл. 1). Найбільше зростання показників вмісту хлорофілів (%) порівняно з відповідним контролем зафіксовано при застосуванні Th + Gl + Ag на усіх фонах зволоження: від 22,8% (оптимальне зволоження) до 33,3—60,8% (дефіцит зволоження). Близькими до цих показників вмісту хлорофілів були також показники дослідного варіанту Tv + Gl + Ag, а саме — 14,2% (оптимальне зволоження) та 26,6—56,5% (дефіцит зволоження) (табл. 1).

Одержані результати свідчать про виражений синергетичний ефект між компонентами симбіотичної системи. За даними досліджень *Trichoderma* spp. та *A. radiobacter* можуть посилювати колонізацію коренів грибами *Glomus* sp., які підвищують ефективність засвоєння елементів живлення, що в комплексі стимулює розвиток рослин [19]. Покращення показників рослин *Rubus idaeus* L. у варіантах із застосуванням мікоризації представниками роду *Trichoderma* зумовлене їхньою здатністю синтезувати фітогормоноподібні сполуки, зокрема ауксиноподібні речовини та цитокініни, які стимулюють поділ і розтяг клітин, а також сприяють утворенню додаткових кореневих структур [20]. Представники роду *Glomus* sp. формують арбускулярну мікоризу, що покращує мінеральне живлення, насамперед забезпечення фосфором, та підвищує водоутримувальну здатність кореневої системи, активізуючи меристематичну діяльність клітин [21]. У випадку застосування *Agrobacterium radiobacter* спостережений стимулюючий ефект пояснюється здатністю бактерій продукувати біологічно активні речовини, зокрема індоліл-оцтову кислоту, а також формувати сприятливе мікробне середовище у зоні ризосфери [13].

Зростання рівня хлорофілу в листках малини внаслідок використання полікомпонентної інокуляції підвищувало продуктивність і кінцеву врожайність культури в умовах стресу (посуха). Інтегральним показником ефективності агротехнічних заходів є врожайність сільськогосподарських культур, ягідних (*Rubus* L.) зокрема, яка формується під впливом конкретних ґрунтово-кліматичних умов і елементів технології вирощування, що зумовлюють продуктивність культури й визначають величину та якість урожаю.

Важливими показниками ягідних культур є формування якісного та повноцінного урожаю ягід. Застосування мікоризації в польових умовах сприяє покращенню ростових процесів надземної частини у рослин малини, що позитивно впливає на рівень продуктивності за абіотичних стресових умов. Встановлено, що як в умовах посухи, так і за оптимального зволоження інокуляція рослин малини грибами *Trichoderma* spp., *Glomus* sp. та бактеріальними симбіонтами *Agrobacterium* покращувала показники продуктивності культури, що у кінцевому підсумку впливало на приріст врожайності. Водночас, комбіновані варіанти інокуляції грибами *Trichoderma* spp. та *Glomus* sp. із бактеріями *Agrobacterium radiobacter* дали значно вищі показники по всіх параметрах продуктивності малини порівняно із тернарною композицією грибів окремо (*Trichoderma* spp. + *Glomus* sp.), без включення бактеріальних симбіонтів у багатокомпонентну систему, що свідчить про їхню синергічну дію (табл. 2).

Мікоризовані рослини у варіанті *Trichoderma viride* + *T. harzianum* + *Glomus* sp. на різних фонах зволоження характеризувалися більшою

2. Продуктивність та урожайність рослин малини *R. idaeus* L. залежно від інюкуляції та фону зволоження (середнє за 2023—2025 рр.)

№ з/п	Варіант дослід	Маса плодів з одного куша, кг			Маса однієї ягоди, г			Біологічна урожайність (розрахункова), т/га			Урожайність до контролю, ± %		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	Контроль	1,40	1,20	1,05	4,0	3,7	3,0	9,2	9,0	8,4	—	—	—
2	Th + Tv + Gl	1,52	1,38	1,18	4,4	4,1	3,7	10,1	9,8	9,3	+8,8	+8,8	+10,7
3	Tv + Gl + Ar	1,56	1,43	1,31	4,4	4,2	3,9	10,2	10,0	9,7	+10,8	+11,1	+15,4**
4	Th + Gl + Ar	1,59	1,45	1,34	4,6	4,4	4,0	10,6	10,2	9,8	+15,2**	+13,3**	+16,6**
Примітка: *достовірна різниця між показниками варіантів порівняння «1» і «2»; 3; 4» (p<0,05); #достовірна різниця між показниками варіантів порівняння «2» і «3»; 4» (p<0,05).													
Умовні позначення: I — оптимальний фон зволоження; II — помірна посуха; III — сильна посуха; Tv — <i>Trichoderma viride</i> ; Th — <i>Trichoderma harzianum</i> ; Gl — <i>Glomus</i> sp.; Ar — <i>Agrobacterium radiobacter</i> .													

масою плодів з куша (від 12,3 до 24,8%), а також масою однієї ягоди (від 10 до 23,3%) порівняно з контролем. Загальна урожайність при оптимальному зволоженні становила 10,1 т/га, що було більше на 8,8% порівняно з контрольним варіантом. В умовах дефіциту зволоження отримано 8,8% (помірна посуха) та 10,7% (сильна посуха) приросту урожайності у порівнянні з відповідним контролем (табл. 2).

Встановлено, що застосування бактерій *Agrobacterium radiobacter* при колонізації ендомікоризними грибами *Glomus* / *Trichoderma* впливає на ступінь мікоризного симбіозу, що також впливає на структуру продуктивності рослин в умовах ґрунтової посухи. Найвищі цільові показники досягнуто при комплексній тернарній інокуляції *T. harzianum* + *Glomus* sp. + *A. radiobacter*, що практично були рівними іншому дослідному варіанту — *T. viride* + *Glomus* sp. + *A. radiobacter* (табл. 2). Аналіз даних показав, що маса плодів з куша у цих двох варіантах зростає у 1,11—1,13 раза за інокуляції при оптимальному зволоженні, та у 1,19—1,27 раза в умовах дефіциту зволоження (посухи). Також зафіксовано зростання маси однієї ягоди: при оптимальному зволоженні від 10 до 15%, та від 13,5 до 33,3% в умовах посухи (табл. 2). Загальна урожайність при оптимальному зволоженні у цих двох варіантах інокуляції становила відповідно 10,2 та 10,6 т/га, що було на 10,8 та 15,2% більше ніж на контрольному варіанті. В умовах дефіциту зволоження отримані показники приросту урожайності порівняно з контролем такі: 11,1 та 13,3% (помірна посуха); 15,4 та 16,6% (сильна посуха) відповідно.

ВИСНОВКИ

Отримані дані підтверджують, що поєднання арбускулярних мікоризних грибів із іншими стимулюючими мікроорганізмами грибного та/або бактеріального походження є найбільш ефективним підходом для інтенсифікації росту в умовах абіотичного стресу, зокрема ґрунтової посухи, що у підсумку позначається на продуктивності ягідних культур (*R. idaeus* L.). Комбіновані варіанти інокуляцій із включенням бактерій *Agrobacterium radiobacter* у полікомпонентний багатофункціональний консорціум грибів-мікоризоутворювачів (*Trichoderma* spp., *Glomus* sp.) дає значно вищі показники по всіх цільових параметрах, що свідчить про їхню синергічну дію.

Результати досліджень можуть бути використані у сільськогосподарській практиці при вирощуванні *Rubus idaeus* L. в умовах відкритого ґрунту, особливо в органічному ґґдництві, а також покладені в основу для розробки нових біоінокулянтів.

Пропозиції щодо подальших досліджень. Провести польові випробування з використанням полікомпонентної багатофункціональної інокуляції на основі мікоризоутворюючих грибів і бактерій з метою

оцінки ефективності дії щодо пригнічення/загибелі основних патогенних мікроорганізмів на культурі малини (*Rubus* L.), а також покращення «здоров'я» ґрунту.

Фінансування. Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів: автори декларують про відсутність конфлікту інтересів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Schulz M., Chim J. F. Nutritional and bioactive value of *Rubus* berries. Food Bioscience. 2019. Vol. 31. Article 100438. doi: 10.1016/j.fbio.2019.100438
2. Ovcharuk V., Muliarchuk O., Stepanchenko V. et al. Organic raspberry cultivation in Lviv region. Scientific Horizons. 2025. Vol. 28(2). P. 43-54. doi: 10.48077/scihor2.2025.43
3. Oszust K., Pylak M., Frac M. *Trichoderma*-based biopreparation with prebiotics supplementation for the naturalization of raspberry plant rhizosphere. International Journal of Molecular Sciences. 2021. Vol. 22(12). Article 6356. doi: 10.3390/ijms22126356
4. Kim M.R., Bernard F.R. Chapter 27 - *Glomus*. Beneficial Microbes in Agro-Ecology. ; Eds. N. Amaresan, M. Senthil Kumar, K. Annapurna, Krishna Kumar, A. Sankaranarayanan. Beneficial Microbes in Agro-Ecology, Academic Press, Pages 561-569. doi: 10.1016/B978-0-12-823414-3.00027-7
5. Guzman-Guzman P., Kumar A., de Los Santos-Villalobos S. et al. *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases-A Review. Plants. 2023. Vol. 12(3). Article 432. doi: 10.3390/plants12030432
6. Lu Q., Bunn R., Whitney E. et al. Arbuscular mycorrhizae influence raspberry growth and soil fertility under conventional and organic fertilization. Frontiers in microbiology. 2023. 14. Article 1083319. doi: 10.3389/fmicb.2023.1083319
7. Tsvetkov I., Dzhambazova T., Kondakova V., Batchvarova R. Mycorrhizal fungi *Glomus* spp. and *Trichoderma* spp. in viticulture (review). Bulg. J. Agric. Sci. 2014. 20. №4. P. 849-855. <https://www.agrojournal.org/20/04-19.pdf>
8. Robledo-Buritica J., Aristizabal-Loaiza J.C., Ceballos-Aguirre N., Cabra-Cendales T. Influence of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on blackberry (*Rubus glaucus* Benth. cv. thornless) growth under semi-cover and field conditions. Acta Agronomica. 2018. 67(2). P. 258-263. doi: 10.15446/acag.v67n2.62572
9. Саблук В., Димитров С. Ефект симбіозу грибів і бактерій з кореневою системою проса прутюподібного *Panicum virgatum* L. Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. 2020. № 28. С. 173-181. doi: 10.47414/np.28.2020.211071

10. Giorgi V., Amicucci A., Landi L. et al. Effect of bacteria inoculation on colonization of roots by *Tuber melanosporum* and growth of *Quercus ilex* seedlings. *Plants*. 2024. 13(2). Article 224. doi: 10.3390/plants13020224
11. Brown P.J.B., Chang J.H., Fuqua C. *Agrobacterium tumefaciens*: a transformative agent for fundamental insights into host-microbe interactions, genome biology, chemical signaling, and cell biology. *J Bacteriol*. 2023. Article 205(4):e0000523. doi: 10.1128/jb.00005-23
12. Zhang L., Li X., Zhang F., Wang G. Genomic analysis of *Agrobacterium radiobacter* DSM 30147(T) and emended description of *A. radiobacter* (Beijerinck and van Delden 1902) Conn 1942 (Approved Lists 1980) emend. Sawada et al. 1993. *Standards in genomic sciences*. 2014. Vol. 9(3). P. 574-584. doi: 10.4056/sigs.4688352
13. Konup L., Pikovskyi M., Riabyi M. et al. Crown gall of grapevine and prospects for its biological control. *Plant and Soil Science*. 2024. 15(3). P. 54-67. doi: 10.31548/plant3.2024.54
14. Дацько О.М., Бакуменко О.М., Гордієнко В.В. Ефект інокуляції на вирощування кукурудзи та покращення здоров'я ґрунту. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 139. С. 62-71. doi: 10.32782/2226-0099.2024.139.1.9
15. Інститут експертизи сортів рослин України. Охорона прав на сорти рослин: Бюлетень. 2018. № 6. С. 185-186. <http://sort.sops.gov.ua/cultivar/view/220/218>
16. Держспоживстандарт України ISO 11465:2001. Якість ґрунту. Визначення сухої речовини та вологості за масою. Правиметричний метод. [Чинний від 2003-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 13 с. (Національний стандарт України).
17. Gräf M., Immitzer M., Hietz P., Stangl R. Water-stressed plants do not cool: leaf surface temperature of living wall plants under drought stress. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Article 3910. doi: 10.3390/su13073910
18. Pavan Kumar Naik B., Sam Ruban J., Alekya Naidu S., Preethi Petricia J. Effect of drought stress and mineral nutrition in plant growth and development. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*. 2022. Vol. 11(5). P. 109-114. doi: 10.20546/ijc-mas.2022.1105.014
19. Ouhaddou R., Anli M., Ben-Laouane R. et al. The importance of the *Glo-mus* genus as a potential candidate for sustainable agriculture under arid environments: A review. *International Journal of Plant Biology*. 2025. Vol. 16(1). Article 32. doi: 10.3390/ijpb16010032
20. Guzman-Guzman P., Etesami H., Santoyo G. *Trichoderma*: a multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC Microbiol*. 2025. Vol. 25(1). Article 434. doi: 10.1186/s12866-025-04158-2
21. Phillips J.M., Hayman D.A. Improved procedures for clearing roots and

staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society. 1970. Vol. 55. P. 158-161. doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3

^{1,2}**Chabaniuk Ya.**, ORCID: 0009-0006-4541-5404

²**Zhmur O.**, ORCID: 0000-0002-1327-978X

¹LLC «Institute of Agrobiolgy», 4 Vatslava Havela Blvd.,
Building 45, Kyiv, 03067, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroiv Oborony str., Kyiv, 03041, Ukraine

The effect of mycorrhizal fungi and bacterial endosymbionts on the productivity of raspberry plants under water-stressed conditions

Goal. A study investigating the impact of a multicomponent, multifunctional inoculation comprising mycorrhizal fungi (*Trichoderma* and *Glomus* species) and bacteria (*Agrobacterium*) on the growth and productivity of raspberry plants (*Rubus idaeus* L.) under abiotic stress conditions (drought). **Materials and methods.** The research was conducted in open ground conditions at the experimental site of the Institute of Agrobiolgy LLC in Vysoke village, Brusyliv district, Zhytomyr region, from 2023 to 2025. The experimental plantings were cultivated using the Ukrainian-bred raspberry variety 'Vognik'. The research design involved combinatorial inoculation of the fungi *Trichoderma* spp. and *Glomus* sp. and the bacteria *Agrobacterium radiobacter* into the rhizosphere of the plants via fertigation, under different soil moisture conditions: sufficient ($80 \pm 5\%$ field capacity (FC)), moderate drought (50% FC) and severe drought (30% FC). General scientific and special methods were employed, including field, laboratory and statistical methods. The fungal strains (*Trichoderma viride* eko/103, *T. harzianum* eko/101 and *Glomus* sp. eko/104) were obtained from the Institute of Agrobiolgy LLC's culture collection, while the *Agrobacterium radiobacter* bacteria were isolated directly by the authors. **Results.** Field trials involving the inoculation of raspberry plants with *Trichoderma* and *Glomus* fungi and *Agrobacterium* bacterial symbionts demonstrated improvements in the plants' overall condition and increased their resistance to stress under soil drought conditions. This reduced the leaf surface temperature by 5.8—11.2%, promoted the activation of photosynthesis and increased the content of chlorophylls «a» and «b» by 16.6—60.8%. It also increased productivity, with the weight of fruit per bush increasing by 1.08—1.27 times and the weight of a single berry by 13.5—33.3%. The final crop yield increased by 8.8—16.6% under various conditions of moisture deficiency. **Conclusions.** The combined inoculation of mycor-

rhizal fungal consortia and bacterial endosymbionts — *Trichoderma* spp., *Glomus* sp. and *Agrobacterium radiobacter* — has a positive effect on the productivity parameters of *Rubus idaeus* L. raspberries compared to the control (untreated) group in conditions of moisture deficiency. This symbiotic effect of the three-way microbial consortium with the *R. idaeus* L. rhizosphere is due to the microorganisms' synergistic action in a multicomponent system and their mutual influence. These findings are of practical importance for enhancing the efficiency of raspberry cultivation in open ground.

Trichoderma; Glomus; Agrobacterium; Rubus; mycorrhization; yield

REFERENCES

1. Schulz M., Chim J.F. (2019). Nutritional and bioactive value of *Rubus* berries. Food Bioscience, 31, Article 100438. doi: 10.1016/j.fbio.2019.100438
2. Ovcharuk V., Muliarchuk O., Stepanchenko V., Kozina T., Padalko T. (2025). Organic raspberry cultivation in Lviv region. Scientific Horizons, 28(2), 43-54. doi: 10.48077/scihor2.2025.43
3. Oszust K., Pylak M., Frąc M. (2021). *Trichoderma*-based biopreparation with prebiotics supplementation for the naturalization of raspberry plant rhizosphere. International Journal of Molecular Sciences, 22(12), Article 6356. doi: 10.3390/ijms22126356
4. Kim M.R., Bernard F.R. (N. Amaresan, M. Senthil Kumar, K. Annapurna, Krishna Kumar, A. Sankaranarayanan Eds.) (2020). Chapter 27 — *Glomus*., Beneficial Microbes in Agro-Ecology, Academic Press, Pages 561-569. doi: 10.1016/B978-0-12-823414-3.00027-7
5. Guzman-Guzman P., Kumar A., de Los Santos-Villalobos S., Parra-Cota F.I., Orozco-Mosqueda M.D.C., Fadji A.E., Hyder S. ..., Santoyo G. (2023). *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases-A Review. Plants, 12(3), Article 432. doi: 10.3390/plants12030432
6. Lu Q., Bunn R., Whitney E., Feng Y., DeVetter L.W., Tao H. (2023). Arbuscular mycorrhizae influence raspberry growth and soil fertility under conventional and organic fertilization. Frontiers in microbiology, 14, Article 1083319. doi: 10.3389/fmicb.2023.1083319
7. Tsvetkov I., Dzhambazova T., Kondakova V., Batchvarova R. (2014). Mycorrhizal fungi *Glomus* spp. and *Trichoderma* spp. in viticulture (review). Bulg. J. Agric. Sci., 20(4), 849-855. <https://www.agrojournal.org/20/04-19.pdf>
8. Robledo-Burítica J., Aristizabal-Loaiza J.C., Ceballos-Aguirre N., Cabra-Cendales T. (2018). Influence of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on blackberry (*Rubus glaucus* Benth. cv. thornless) growth under semi-cover and field conditions. Acta Agronomica, 67(2), 258-263. doi: 10.15446/acag.v67n2.62572

9. Sabluk V., Dymyrov S. (2020). Efekt symbiozu hrybiv i bakterii z korenevoiu systemoiu prosa prutopodibnoho *Panicum virgatum* L. [The effect of fungi and bacteria symbiosis with switchgrass (*Panicum virgatum* L.) root system]. Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovnykh buriakiv, [Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet], (28), 173-181. doi: 10.47414/np.28.2020.211071 (in Ukrainian).
10. Giorgi V., Amicucci A., Landi L., Castelli I., Romanazzi G., Peroni C. ..., Neri D. (2024). Effect of bacteria inoculation on colonization of roots by *Tuber melanosporum* and growth of *Quercus ilex* seedlings. *Plants*, 13(2), Article 224. doi: 10.3390/plants13020224
11. Brown P.J.B., Chang J.H., Fuqua C. (2023). *Agrobacterium tumefaciens*: a transformative agent for fundamental insights into host-microbe interactions, genome biology, chemical signaling, and cell biology. *J Bacteriol*, Article 205(4):e0000523. doi: 10.1128/jb.00005-23
12. Zhang L., Li X., Zhang F., Wang G. (2014). Genomic analysis of *Agrobacterium radiobacter* DSM 30147(T) and emended description of *A. radiobacter* (Beijerinck and van Delden 1902) Conn 1942 (Approved Lists 1980) emend. Sawada et al. 1993. *Standards in genomic sciences*, 9(3), 574-584. doi: 10.4056/sigs.4688352
13. Konup L., Pikovskyi M., Riabyi M., Konup A., Kyryk M. (2024). Crown gall of grapevine and prospects for its biological control. *Plant and Soil Science*, 15(3), 54-67. doi: 10.31548/plant3.2024.54
14. Datsko O.M., Bakumenko O.M., Hordiienko V.V. (2024). Efekt inokulatsii na vyroshchuvannia kukurudzy ta pokrashchennia zdorovia gruntu. [Effect of inoculation on maize growth and improvement of soil health]. *Tavriiskyi naukovy visnyk, [Taurida Scientific Herald]*, (139), 62-71. doi: 10.32782/2226-0099.2024.139.1.9 (in Ukrainian).
15. Instytut ekspertyzy sortiv roslyn Ukrainy. (2018). Okhorona prav na sorty roslyn: Biulleten [The plant variety rights protection Bulletin], (6), 185-186. <http://sort.sops.gov.ua/cultivar/view/220/218> (in Ukrainian).
16. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2002). Yakist gruntu. Vyznachannia sukhoi rechovyny ta volohosti za masoiu. Hravimetrychnyi metod: DSTU ISO 11465:2001. (Chynnyi vid 2003-01-01, Natsionalnyi standart Ukrainy). Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2002. 13 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy). [Soil quality. Determination of dry matter and moisture by mass. Gravimetric method: DSTU ISO 11465:2001. (Effective from 2003-01-01, National Standard of Ukraine)]. Kyiv. 13 s. (in Ukrainian).
17. Gräf M., Immitzer M., Hietz P., Stangl R. (2021). Water-stressed plants do not cool: leaf surface temperature of living wall plants under drought stress. *Sustainability*, (13), Article 3910. doi: 10.3390/su13073910
18. Pavan Kumar Naik B., Sam Ruban J., Alekya Naidu S., Preethi Petricia J.

(2022). Effect of drought stress and mineral nutrition in plant growth and development. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 11(5), 109-114. doi: 10.20546/ijc-mas.2022.1105.014

19. Ouhaddou R., Anli M., Ben-Laouane R., Boutasknit A., Baslam M., Meddich A. (2025). The importance of the *Glomus* genus as a potential candidate for sustainable agriculture under arid environments: A review. *International Journal of Plant Biology*, 16(1), Article 32. doi: 10.3390/ijpb16010032

20. Guzman-Guzman P., Etesami H., Santoyo G. (2025). *Trichoderma*: a multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC Microbiol*, 25(1), Article 434. doi: 10.1186/s12866-025-04158-2

21. Phillips J.M., Hayman D.A. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, (55), 158-161. doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3

Надійшла до редакції: 06.10.2025

Прийнята до друку: 20.10.2025

Надруковано й опубліковано онлайн: грудень 2025