

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ОЗДОРОВЛЕННЯ ҐРУНТУ В АГРОЕКОСИСТЕМІ ПЛОДОВОГО САДУ

Д. І. СИНЕНКО¹, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (доктор філософії)

О. С. ДЕМ'ЯНЮК¹, доктор сільськогосподарських наук

Р. В. ЯКОВЕНКО², доктор сільськогосподарських наук

О. О. ФОМЕНКО², викладач

¹ Інститут агроєкології і природокористування НААН

² Уманський національний університет

Екологічний стан ґрунту під багаторічними плодовими насадженнями викликає занепокоєння, що пов'язано з проявом ґрунтової і хвороби реплантації. Це завдає значних економічних збитків галузі садівництва, скорочує терміни експлуатації нових садів, загострює екологічні проблеми та потребує ефективних безпечних заходів поліпшення стану ґрунту. Ця стаття містить огляд результатів досліджень сучасних підходів щодо оздоровлення ґрунту під багаторічними плодовими насадженнями. Вони базуються на застосуванні різних методів дезінфекції ґрунту та біологічних стратегій регуляції його мікробного ценозу, розширення мікро- та фіторізноманіття. В результаті поліпшуються агрофізичні та біологічні властивості ґрунту, що призводить до покращення ростових показників дерев і підвищує загальну продуктивність плодових насаджень.

Ключові слова: *плодові насадження, оздоровлення ґрунту, ґрунтовома, хвороба реплантації, мікробіом ґрунту, хімічна дезінфекція, біологічні методи, біофумігація, інокуляція.*

Постановка проблеми. Необхідність поліпшення екологічного стану ґрунтів садових агроєкосистем, що забезпечить підвищення ефективності галузі садівництва і збільшення виробництва якісних та безпечних плодів, спонукає до активного пошуку, розроблення й широкого впровадження ефективних екологічних способів усунення негативних наслідків ґрунтової.

Оскільки проблема ґрунтової не є новою, у світі вже напрацьовано та впроваджується низка стратегій із оздоровлення ґрунтів під багаторічних плодовими насадженнями. Проте в умовах підвищених екологічних стандартів увага дослідників фокусується на розробці більш ефективних біологічних методів для просування сталого сільського господарства, збалансованого управління агроресурсами та їх збереження.

Мета досліджень. Аналіз сучасних результатів досліджень щодо відновлення екологічного стану ґрунту в агроєкосистемі насадження яблуні, для зниження негативного прояву ґрунтової.

Матеріали і методи. Методологічну основу дослідження становили сучасні наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених. Методи дослідження включали системний підхід, порівняльний аналіз та узагальнення.

Результати досліджень. Наразі для поліпшення екологічного стану ґрунту за вирощування плодових культур найчастіше на практиці застосовують різні системи удобрення, хімічну фумігацію ґрунту, соляризацію, анаеробне знезараження ґрунту тощо (рис. 1).

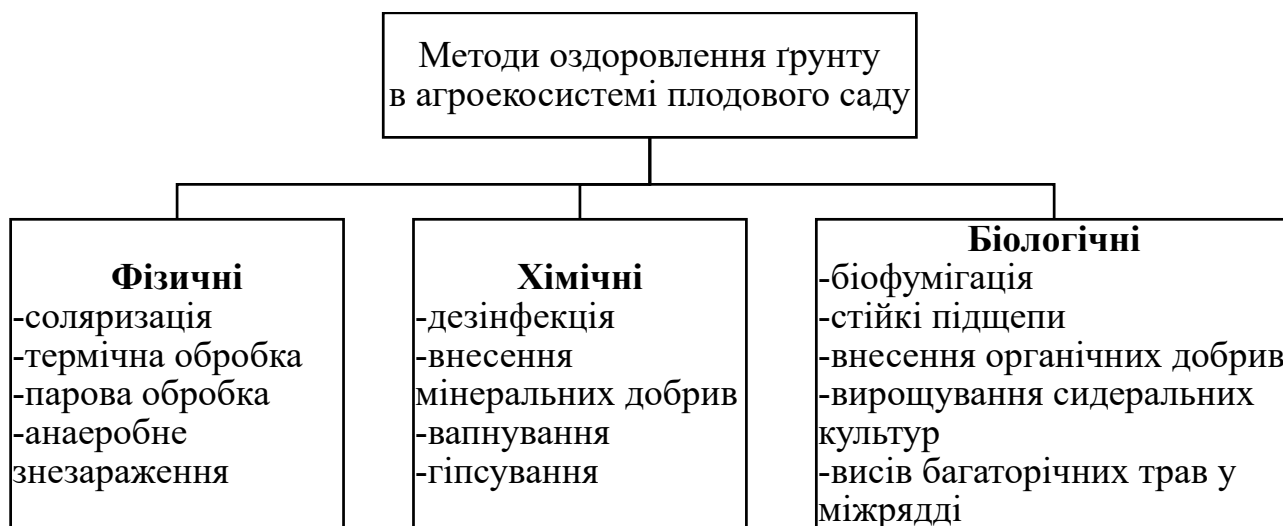


Рис. 1. Основні методи поліпшення стану ґрунту в агроекосистемі плодового саду

Примітка. Побудовано авторами.

Біологічні стратегії включають, вирощування в міжрядді певних видів рослин для біофумігації і біоремедіації із подальшим їх заорюванням, внесення органічних добрив, а також різних біостимуляторів та органічних добавок, інокуляцію мікоризними грибами, використання підщеп, які сприяють стійкості рослин до різних чинників [1–6]. Варто зазначити, що переважна більшість сільськогосподарських угідь, які нині використовуються, вимагає поліпшення ґрунту та відновлення його біологічних властивостей [7], у тому числі всіх компонентів мікробіому.

Одним із способів зниження негативного впливу ґрунтовтоми на молоді дерева є внесення добрив, що впливає на збагачення ґрунту органічною речовиною [1, 8]. Так, дослідженнями П. Г. Копитка та ін. [9] встановлено, що за 20-річний період внесення гною вміст гумусу у метровому шарі темно-сірого опідзоленого ґрунту зріс на 34 т/га. У перший період росту молодих дерев гумусованість ґрунту підвищується безпосередньо як від унесення добрив, так і внаслідок нарощування біомаси дерев, зокрема листя й коріння, та відповідного збагачення ґрунтового середовища органічними речовинами. Пізніше значно інтенсифікується біологічна активність більш гумусованого удобрюваного ґрунту, особливо мінералізаційні процеси за його парового обробітку, що зумовлює інтенсивнішу мінералізацію органічних речовин, зокрема новоутворених гумусових сполук.

Близькі показники родючості ґрунту формуються за орґано-мінеральної системи удобрення – довготривалого внесення половинних норм орґанічних (ґній 20 т/га) та мінеральних ($N_{60}P_{60}K_{60}$) добрив разом. Проте, за мінеральної системи ($N_{120}P_{120}K_{120}$) значно зростає кислотність ґрунту, а накопичення гумусу і вміст доступних для живлення рослин макроелементів відбувається повільніше і зовсім не збагачується ґрунт мікроелементами [10].

Подібний ефект виявлено в дослідженнях К. Styła та А. Sawicka [11]. Дослідники встановили, що в насадженнях яблуні, вирощуваної повторно на місці розкорчованого саду, внесення азоту в нормі 65 кг/га і 95 кг/га сприяло покращенню мікробіологічного стану ґрунту порівняно з контрольним варіантом (без удобрення) та варіантом, де вносили меншу кількість азоту.

Натомість у дослідженнях L. Xiang та ін. [12] виявлена тісна позитивна кореляція між умістом азоту і кількістю *Fusarium* у ґрунті. Це свідчить, що надмірне внесення азотних добрив призводить до змін у мікобіомі ризосфери ґрунту плодкових дерев та накопичення патогена.

Як альтернатива мінеральним добривам, внесення компосту у ґрунт при вирощуванні дерев яблуні мало позитивний вплив на накопичення орґанічної речовини та доступних поживних речовин на всій глибині, підвищило рН ґрунту, що поліпшувало продуктивність дерев і якість плодів. Покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту опосередковано спричинило зміни у складі, багатстві та різноманітності ґрунтових бактеріальних угруповань. Зокрема чисельність представників *Proteobacteria*, *Bacteroidetes* і *Cyanobacteria* зростала за внесення компосту у ґрунт, а чисельність *Chloroflexi*, *Acidobacteria*, *Nitrospirae*, *Gemmatimonadetes* і *Actinobacteria* – навпаки, зменшувалась. Чисельність деяких домінуючих родів *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Rhodanobacter*, *Arthrobacter*, *Devosia*, *Serratia* та *Streptomyces*, які є ключовими учасниками у стимуляції росту рослин та/або індукції та придушення хвороби пересадки, зросла за внесення компосту. Тоді як чисельність мікроорґанізмів із родів *Gemmatimonas*, *Phenylobacterium*, *Nitrospira*, *Sphingomonas* і *Nitrosospora*, які потенційно можуть спричинити хворобу реплантації, зменшилась за внесення компосту [13].

Внесення орґанічних добрив при вирощуванні насаджень яблуні в Японії показало підвищення вмісту у ґрунті поживних речовин (загальний вміст вуглецю, азоту, співвідношення C/N), що своєю чергою збільшило вміст мікробної біомаси у ґрунті. Це свідчить про те, що методи орґанічного садівництва можна використовувати для збереження ґрунту в агроєкосистемах яблуневого саду, зберігаючи при цьому їх високу продуктивність та забезпечувати якість і безпеку вирощених плодів [14].

Серед негативних наслідків монокультури є зниження рН ґрунту, накопичення токсичних речовин і дисбаланс поживних речовин у ґрунті. Підкислення ґрунту може змінити мікробне угруповання, знизити активність нітрифікуючих та азотфіксуючих бактерій, силікатних і фосфорних бактерій, а також збільшити чисельність патогенних грибів, які перешкоджають перетворенню поживних речовин у ґрунті та уражують рослини. Для подолання цих негативних наслідків застосовують різні хімічні добавки (наприклад,

негашене вапно у поєднанні з суперфосфатом), які поліпшують фізичні і хімічні властивості ґрунту, оптимізують структуру мікробіому, підвищують різноманітність ґрунтового мікробного угруповання та активність ферментів, сприяють росту саджанців та зменшують їх ураження збудниками хвороб при пересадці [15]. Вони мають низьку вартість та значний потенціал для більш широкого використання [16].

Серед найбільш ефективних методів подолання ґрунтової і хвороби реплантації є хімічна дезінфекція ґрунту, загальною метою якої є зменшення чисельності патогенних мікроорганізмів і шкідників. Проте такі методи вважають економічно затратними, а в деяких випадках екологічно небезпечними і, крім того, вони є тимчасовим рішенням проблеми. Однак навіть це робить їх більш популярними і їх широко застосовують порівняно з біологічними методами.

Бромистий метил найбільше використовували як фумігант з 1940 р. через його широкий спектр дії. Однак через руйнівний вплив на озоновий шар нині цю сполуку заборонено в усьому світі. Проте інші фуміганти широкого спектру дії, такі як дазамет, метам натрію, 1,3-дихлорпропен і ціанамід кальцію нині використовуються у багатьох країнах світу як ефективні засоби для контролю збудників хвороб, що передаються через ґрунт [17].

Зокрема, показано, що фумігація дазаметом зменшує симптоми ґрунтової, при цьому має довготривалу дію на мікробні угруповання ґрунту, зокрема шляхом збільшення деяких видів корисних мікроорганізмів [18].

Водночас хімічна фумігація ґрунту визнана деструктивним методом, неселективним щодо біологічних мішеней ґрунту, що призводить до різного ступеня зміни видової різноманітності та чисельності ґрунтових мікроорганізмів, а також ферментативної активності ґрунту. Крім того, існують значні відмінності у впливі різних хімічних фумігантів на ґрунтові мікроорганізми. Внаслідок невибіркової дії хімікатів і накопиченню їх залишків у ґрунтовому середовищі, час відновлення ґрунту зазвичай є тривалим. Тому все частіше дослідники зазначають про необхідність зменшення застосування хімічних засобів захисту рослин, які використовуються в промисловому садівництві або заміні їх на більш безпечні.

Серед хімічних фумігантів діоксид хлору визнано найбезпечнішим дезінфікуючим засобом та високоефективним в інактивації патогенних бактерій, грибів і вірусів [19]. Механізм дії діоксиду хлору є розкладання амінокислот, зміна конфігурації білка та руйнування клітинних мембран патогенних мікроорганізмів [20]. Дослідженнями G. Wang та ін. [21] показано, що розчини діоксиду хлору в різних концентраціях певною мірою пригнічували ріст міцелію та проростання спор *F. proliferatum*, *F. solani*, *F. oxysporum* і *F. moniliforme*, але більш значний стерилізуючий ефект на чотири види *Fusarium* відмічено за концентрації 600 мг/л. Також було показано позитивний вплив на фізіологічні процеси у рослинах яблуні, а саме підвищення активності ферментів (супероксиддисмутази, каталази і пероксидази) та зменшення вмісту малонового діальдегіду у коренях. Крім того, довжина кореня, площа поверхні, об'єм і кількість проростків збільшилися на 31,7 %, 96,5 %, 257,3 % і 85,3 % відповідно.

Отже, ураження коренів було зведено до мінімуму, а стійкість рослин до стресу зростає, тим самим послаблюючи наслідки хвороби реплантації.

Як альтернативу хімічній фумігації для сталого управління агроєкосистемою яблуневого саду для зменшення негативних наслідків ґрунтовими застосовують біологічні методи, такі як біофумігація, вирощування покривних культур, інокуляція мікоризними препаратами та їх поєднання у різних комбінаціях.

Метод біофумігації базується на вивільненні токсичних метаболітів із біологічного матеріалу, наприклад представників родини *Brassicaceae*. Рослини, які використовують для біофумігації, продукують специфічні сполуки – вторинні метаболіти (наприклад, глюкозинолати) і тіофенові сполуки, які мають фунгіцидну, нематоцидну, інсектицидну та антивірусну дію. Такі властивості рослин дозволяють зменшити чисельність патогенних організмів у ґрунті, в тому числі *Phytophthora cactorum*, *Fusarium oxysporum* [22].

Біофумігація є більш екологічно ефективною. Серед позитивних ефектів від застосування цього методу дослідники зазначають про підвищення родючості ґрунту та збільшення чисельності корисних видів мікроорганізмів, зменшення популяції патогенних мікроорганізмів, що відповідно покращує ріст сільськогосподарських культур та їх врожайність [23].

Під час біофумігації свіжі посіви *Brassicaceae*, багаті глюкозинолатом, подрібнюють і вносять у ґрунт для досягнення природного утворення ізотіоціанату. Як альтернативу застосовують борошно з насіння *Brassicaceae* або водну витяжку. Такі культури як *Brassica juncea*, *Sinapis alba*, *Eruca sativa* (або *Raphanus sativus*) виявляють потенційні біофумігаційні властивості.

Наразі найкращих результатів проти хвороби пересадки було досягнуто за використання композиції насіння *Brassica juncea* та *Sinapis alba* (1 : 1) у нормі внесення 4,4 т/га в поєднанні з стійкими підщепами яблуні. Автори зазначають, що вплив біофумігації на мікробіом ґрунту та нематоди пов'язаний із покращенням здоров'я рослин. Однак необхідні додаткові дослідження, що б оптимізувати ефективність цього методу, яка залежить від регіону і ґрунтово-кліматичних умов [24].

Біооновлення з використанням насіння *Brassica*, ще одна альтернатива регенерації ґрунту і пом'якшення наслідків хвороби реплантації, що передбачає внесення в ґрунт специфічних залишків *Brassica* з наступним покриттям ґрунту плівкою. Рослини *Brassicaceae* містять різноманітний набір глюкозинолатів, які за дії рослинного ферменту мірозинази утворюють різноманітні продукти гідролізу, найактивнішими з яких є ізотіоціани. Проведені дослідження із внесенням у ґрунт борошна з насіння *Brassica* показали значні зміни у складі ризосферного мікробіому та активізацію росту дерев [25].

Одним із найбільш досліджених ефектів біофумігації є нематоцидний ефект. Т. Dutta та ін. [26] дійшли висновку, що біофумігація із застосуванням лише *Brassicaceae* менш ефективна у боротьбі з паразитичними нематодами рослин, але за поєднання з іншими методами, такими як соляризація ґрунту або мінімальне використання нематоцидів, можна досягти прийняттого контролю паразитичних нематод рослин.

Також було досліджено, що біофумігація ґрунту взятого з 25-річного насадження яблуні сухим порошком із чорнобривців (*Tagetes erecta*) збільшила інтенсивність фотосинтезу вирощуваних на цьому ґрунті саджанців яблуні, швидкість дихання їх коренів та активність ферментів захисту коренів, що вплинуло на вегетативний ріст саджанців *M. hupehensis* [22]. Водночас виявляли позитивні зміни щодо збільшення співвідношення бактерії/гриби у ґрунті, покращення структури ґрунтового мікобіому та зменшення вмісту патогенів висушеної біомаси *T. erecta* є одним із ефективним заходів оздоровлення ґрунту, що позитивно впливає ріст саджанців яблуні.

Х. Kanfra та ін. [27] використовували посіви чорнобривців (*Tagetes*) у розсадниках і яблуневих садах для встановлення ефективності боротьби з фітопатогенними нематодами, як біоагентами хвороби реплантації яблуні. Було показано, що такі параметри яблуні, як маса і довжина пагонів, діаметр стовбура впродовж вегетаційного періоду значно збільшились у варіантах із попереднім вирощуванням *Tagetes*. На цих же ділянках досліді частка нематод-паразитів була достовірно нижчою. Крім того автори зазначають, що вирощування рослин *Tagetes* у садах є економічно вигіднішою порівняно з хімічною дезінфекцією ґрунту та менш шкідливою для навколишнього середовища.

На ефективність біофумігації впливає низка чинників, включаючи кількість утворених активних речовин, температура навколишнього середовища, вміст вологи в ґрунті, тип ґрунту та ін., що потребує додаткових досліджень для кожного конкретного випадку [28]. Ці фактори спричиняють варіабельність ефектів біофумігації у мінливих умовах навколишнього середовища.

У Нідерландах проведено порівняльні дослідження різних способів фумігації ґрунту (органічна, хімічна) [29]. Встановлено позитивний вплив хімічної фумігації на ріст дерев у перші роки після садіння порівняно з варіантами з вирощуванням у міжрядді рослин чорнобривців, внесенням органічних добрив і утриманням ґрунту в міжряддях під чистим паром. У варіанті з вирощуванням чорнобривців і додатковим унесенням органічних добрив і покриттям поверхні ґрунту чорною плівкою показники росту дерев у перші роки були нижчі, а в наступні роки фіксували інтенсивніший ріст дерев, ніж у інших варіантах. Найслабший ріст дерев спостерігали на ділянках з утриманням ґрунту під чистим паром.

Одним із методів поліпшення фітосанітарного і екологічного стану саду є вирощування різних рослин у міжрядді саду, а також сидеральних культур перед закладанням насаджень якому приділяють все більше уваги у моделях сталого управління агроєкосистемою яблуневого саду для збереження родючості ґрунту, зокрема збільшення вмісту органічної речовини та біорізноманіття [30–32].

Вирощування рослинності в міжрядді саду здатне поліпшити якість ґрунту з точки зору фізичних, хімічних і біологічних властивостей як у короткостроковій, так і довгостроковій перспективі [33, 34]. Різні суміші трав здатні змінювати доступність С і N, тим самим впливаючи на структуру і функції ґрунтових мікробних угруповань, що, як наслідок, впливає на продуктивність плодівих насаджень [30, 35].

Було доведено, що рослини є потенційним способом збільшення біорізноманіття в агроєкосистемі саду, ефективні у боротьбі з бур'янами та ерозією ґрунту, збереженні вологи, підвищенні вмісту органічної речовини ґрунту та активності ферментів [36–39].

Найпоширенішими видами є чорнобривці (*Tagetes* L.), гірчиця (*Sinapis alba*, *Sinapis arvensis*, *Sinapis juncea*), редька олійна (*Raphanus sativus* var. *oleifera*), ріпак ярий (*Brassica napus*), жито (*Secale cereale* L.), овес щетинистий (*Avena strigosa*), конюшина (*Trifolium pratense* L.), які вирощують як попередники або сидерати для поліпшення поживного режиму ґрунту, збагачення органічною речовиною, збільшення біорізноманіття, боротьби з бур'янами та ерозією ґрунту, зменшення кількості шкідливих нематод, патогенних бактерій, грибів і ооміцетів у ґрунті, а також забезпечують додаткове виробництво біомаси [24, 36]. Зазначають також про позитивний вплив трав на водний режим ґрунту та врожайність яблуні та інших плодових і ягідних культур, але й про значну залежність від низки чинників, зокрема від виду культури, погодних умов року, віку насаджень та структури ландшафту тощо [36].

Дослідження показали, що незалежно від виду вирощуваних рослин (*Tagetes patula* L., *Sinapis alba*, *Raphanus sativus* var. *oleifera*) спостерігали збільшення кількості операційних таксономічних одиниць корисних видів мікроорганізмів *Proteobacteria*, *Bacteroidota*, *Patescibacteria*, *Chloroflexi*, *Fatescibacteria* та *Verrucomicrobiota*, але водночас фіксували зменшення чисельності *Firmicutes*, *Acidobacteriota* та *Actinobacteriota*. Також зростала кількість деяких домінантних родів бактерій у пересадженому ґрунті, таких як *Flavobacterium*, *Massila*, *Sphingomonas*, *Arenimonas* і *Devosia*. Ці роди вважають ключовими у стимулюванні росту рослин та індукції імунітету рослин, що опосередковано може свідчити про процеси регенерації ґрунту [40]. Також показано, що за рахунок вмісту біологічно активних сполук у рослинах чорнобривців (*T. patula* і *T. erecta*), вирощування яких у садах або внесення в ґрунт гранул на їх основі, змінюється структура мікробіому, що позитивно впливає на вегетативний ріст дерев яблуні [41, 42].

За порівняння ефективності дії трьох культур (люцерна, ячмінь, чорнобривці) при вирощуванні саджанців яблуні встановлено, що досліджувані культури внаслідок впливу на мікробіом ґрунту та зміну його структури можуть стримувати розвиток патогенних видів грибів, які колонізують корені яблуні за повторного вирощування ґрунту (*Fusarium* spp., *Pythum* spp., binucleate *Rhizoctonia* sp., *Cylindrocarpon* -like-fungi), але частота їх ураження змінюється залежно від виду рослин. У варіантах із рослинами чорнобривців виявлено значне збільшення кількості непатогенних видів грибів, що свідчить про потенціал покривних культур для збільшення біорізноманіття ґрунту в довгострокових системах беззмінних культур і можливості регуляції мікробіому кореневої зони, що впливає на стан насаджень яблуні [34].

Подібні результати отримано Е. Furmanczyk із колегами [43] у досліді із вирощуванням лікарських рослин (*Alchemilla vulgaris*, *Fragaria vesca*, *Mentha x piperita*) в органічному яблуневому саду. Встановлено, що введення багатофункціональних живих мульч на основі лікарських рослин спричинило

зміни в генетичному та функціональному біорізноманітті ґрунту бактерій і популяцій нематод, що призвело до зміни хімічних властивостей ґрунту. Ці модифікації можуть забезпечити екосистемні послуги, пов'язані з доступністю поживних речовин і захистом рослин від шкідливих організмів. Ці послуги особливо актуальні для органічних садів через обмеження у використанні зовнішніх ресурсів (як добрив, так і пестицидів).

Негативні наслідки монокультури можна пом'якшити використовуючи підщепи, які генетично відрізняються від своїх нащадків, та які сприяють розширенню різноманіття рослин у садових біоценозах. Це пов'язано із зростаючим інтересом до багаторічних культур як до ключових компонентів сталого сільського господарства, оскільки підщепи забезпечують один із механізмів, за допомогою якого можна покращити вирощування деревних багаторічних культур у різноманітних екологічних умовах [46]. Проте варто враховувати, що стійкі підщепи повинні мати можливість витримувати вплив регіональних абіотичних умов, таких як клімат, тип ґрунту, рН тощо [47].

Пом'якшення негативних наслідків ґрунтової і хвороби реплантації насаджень яблуні можна досягти шляхом застосування біологічних препаратів на основі корисних штамів мікроорганізмів. Зокрема, доведено позитивний вплив арбускулярних мікоризних грибів, які виконують низку важливих екологічних функцій у біосфері, у підвищенні родючості ґрунту та покращенні його якості, встановленні ефективних симбіотичних зв'язків із рослинами та вплив на їх ріст і розвиток [48]. Показано, що інокуляція мікоризними грибами яблуні забезпечує покращення поживного режиму ґрунту, зменшення чисельності *Fusarium* і тим самим поліпшує загальний стан ґрунтового середовища для пересадки. При цьому фіксували збільшення біомаси саджанців яблуні та їх росту [49].

У дослідженнях Z. Zydlik та ін. [50] встановлено, що біоінокулянти на основі мікоризних грибів і *Trichoderma* spp., особливо за їх спільного внесення, істотно підвищили протеазну активність і дихальну активність ґрунту взятого з площі, де два сезони вирощувалися саджанці яблуні. Комбіноване застосування мікоризних грибів і *Trichoderma* spp. призвело до найбільшої висоти саджанців яблуні в досліді, а також формування найбільшої кількості бічних пагонів і сумарної їх довжини. Отже, використання біоінокулянтів, що містять мікоризу і *Trichoderma* spp. дало змогу значно знизити наслідки ґрунтової в розсаднику яблуні.

Висновки. Ґрунтоптома і пов'язана з нею хвороба реплантації є багатогранною проблемою, тому вимагає застосування комплексних підходів, зокрема поєднання хімічних і біологічних заходів. Наприклад, застосування на першому етапі методу дезінфекції ґрунту має забезпечити зменшення фітопатогенних видів мікроорганізмів за максимального збереження корисних видів у ґрунті. На наступних етапах варто застосовувати кілька біологічних стратегій, які поєднують використання стійких підщеп до хвороби реплантації яблуні, вирощування певних видів рослин, інокуляцію корисними мікроорганізмами тощо, які забезпечать оздоровлення і збереження ґрунту та біорізноманіття, розширення екосистемних послуг.

Література:

1. Яковенко Р. В. Ґрунтовтома та заходи її послаблення в насадженнях яблуні. *Вісник Уманського НУС*. 2021. № 2. С. 69–72. DOI: 10.31395/2310-0478-2021-2-69-72.
2. Zydlik Z., Zydlik P., Jarosz Z., Wieczorek R. The use of organic additives for replanted soil in apple tree production in a fruit tree nursery. *Agriculture*. 2023. № 13(5). 973. DOI: 10.3390/agriculture13050973.
3. Battacharya D., Babgohari M.Z., Rathor P., Prithiviraj B. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic*. 2015. № 196. P. 39–48. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.012.
4. Canellas L. P., Olivares F. L., Aguiar N. O. et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic*. 2015. № 196. P. 15–27. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.013.
5. Soppelsa S., Kelderer M., Casera C. et al. Use of biostimulants for organic apple production: effects on tree growth, yield, and fruit quality at harvest and during storage. *Front. Plant Sci*. 2018. № 9. DOI: 10.3389/fpls.2018.01342.
6. Yim B., Hanschen F. S., Wrede A. et al. Effects of biofumigation using Brassica juncea and Raphanus sativus in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at three field sites with replant disease. *Plant Soil*. 2016. № 406. P. 389–408. DOI: 10.1007/s11104-016-2876-3.
7. Gosnell H. Regenerating soil, regenerating soul: an integral approach to understanding agricultural transformation. *Sustain. Sci*. 2022. № 17. P. 603–620. DOI:10.1007/s11625-021-00993-0.
8. Szczygieł A. Soil fatigue in orchard. Part I. Owoce Warzywa Kwiaty. 2003. № 13. P. 16–17.
9. Копитко П. Г., Яковенко Р. В., Петришина І. П. Поповнення органічними речовинами і гумусованість ґрунту в яблуневих садах за різного удобрення. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2021. № 99. Ч. 1. С. 81–94. DOI:10.31395/2415-8240-2021-99-1-81-94.
10. Копитко П. Г., Яковенко Р. В. Ґрунтові умови та врожайність повторно вирощуваного яблуневого саду за довготривалого удобрення. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2021. № 98. Ч. 1. С. 34–47. DOI:10.31395/2415-8240-2021-98-1-34-47.
11. Styła K., Sawicka A. Microbiological activity of soil against the background of differentiated irrigation and fertilization in apple (*Malus domestica*) orchard after replantation. *Agronomy Research*. 2010. № 8(1). P. 827–836.
12. Xiang L., Wang M., Jiang W. et al. Key indicators for renewal and reconstruction of perennial trees soil: Microorganisms and phloridzin. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. № 225. 112723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112723>.
13. Liang B., Ma C., Fan L., Wang Y., Yuan Y. Soil amendment alters soil physicochemical properties and bacterial community structure of a replanted apple orchard. *Microbiological Research*. 2018. № 216. P. 1–11.
14. Kai T., Adhikari D. Effect of organic and chemical fertilizer application on apple nutrient content and orchard soil condition. *Agriculture*. 2021. № 11(4). DOI:10.3390/agriculture11040340

15. Chen R., Jiang W., Duan Y., Qiao H., Fan H., Chen X., Shen X., Yin C., Mao Z. Effect of emerging soil chemical amendments on the replant soil environment and growth of *Malus hupehensis* Rehd. Seedlings. *ACS Omega*. 2021. № 6(31). P. 20445–20454. DOI:10.1021/acsomega.1c02447.
16. Teodoro M., Trakal L., Gallagher B.N., Šimek P., Soudek P., Pohořelý M., Beesley L., Jačka L., Kovář M., Seyedsadr S., Mohan D. Application of co-composted biochar significantly improved plant-growth relevant physical/chemical properties of a metal contaminated soil. *Chemosphere*. 2020. № 242. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.125255.
17. Jiang W., Chen R., Zhao L., Qin L., Fan H., Chen X., Wang Y., Yin C., Mao Z. Chemical fumigants control apple replant disease: Microbial community structure-mediated inhibition of *Fusarium* and degradation of phenolic acids. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. № 440. DOI:10.1016/j.jhazmat.2022.129786.
18. Nicola L., Turco E., Albanese D., Donati C., Thalheimer M., Pindo M., Insam H., Cavalieri D., Pertot I. Fumigation with dazomet modifies soil microbiota in apple orchards affected by replant disease. *Appl. Soil Ecol.* 2017. № 113. P. 71–79. DOI:10.1016/j.apsoil.2017.02.002.
19. Kwesi I. O., Suresh M., Jianping L., Sreekantha B. J. Chlorine dioxide oxidation of *Escherichia coli* in water – A study of the disinfection kinetics and mechanism. *J. Environ. Sci. Health*. 2017. № 52. P. 598–606.
20. Norio O. Denaturation of protein by chlorine dioxide: oxidative modification of tryptophan and tyrosine residues. *Biochemistry*. 2007. № 46. P. 4898–4911.
21. Wang G., Xie Y., Lv J., Zhang S., Yin C., Liu Y., Mao Z. Effects of soil disinfection using chlorine dioxide on soil fungal communities in apple replant fields and the growth of *Malus hupehensis* Rehd. Seedlings. *Agronomy*. 2025. № 15(1). DOI:10.3390/agronomy15010059.
22. Wang X., Li K., Xu S., Duan Y., Wang H., Yin C., Chen X., Mao Z., Xiang K. Effects of different forms of *Tagetes erecta* biofumigation on the growth of apple seedlings and replanted soil microbial environment. *Horticulturae*. 2022. № 8. DOI:10.3390/horticulturae8070633.
23. Ji Y., Zhang Y., Fang W., Li Y., Yan D., Cao A., Wang Q. A review of biofumigation effects with plant materials. *New Plant Prot.* 2024. № 1. DOI:10.1002/npp2.21.
24. Hanschen F. S., Winkelmann T. Biofumigation for fighting replant disease – a review. *Agronomy*. 2020. № 10(3). DOI:10.3390/agronomy10030425.
25. DuPont S. T., Hewavitharana S. S., Mazzola M. Field scale application of Brassica seed meal and anaerobic soil disinfestation for the control of apple replant disease. *Applied Soil Ecology*. 2021. № 166. DOI:10.1016/j.apsoil.2021.104076.
26. Dutta T. K., Khan M. R., Phani V. Plant-parasitic nematode management via biofumigation using brassica and non-brassica plants: Current status and future prospects. *Curr. Plant Biol.* 2019. № 17. P. 17–32.
27. Kanfra X., Obawolu T., Wrede A., Strolka B., Winkelmann T., Hardeweg B., Heuer H. Alleviation of nematode-mediated apple replant disease by pre-cultivation of tagetes. *Horticulturae*. 2021. № 7. DOI:10.3390/horticulturae7110433.

28. Morris E. K., Fletcher R., Veresoglou S. D. Effective methods of biofumigation: A meta-analysis. *Plant and Soil*. 2020. № 446(1-2). P. 379–392. DOI:10.1007/s11104-019-04352-y.
29. Vliegen-Verschure A. Fumigation using mustard seed meal instead of mustard. *EFM*. 2013. № 2. P. 6–7.
30. Brewer M., Kanissery R.G., Strauss S.L., Kadyampakeni D.M. Impact of cover cropping on temporal nutrient distribution and availability in the soil. *Horticulturae*. 2023. № 9. 1160.
31. Haring S., Gaudin A.C.M., Hanson B.D. Functionally diverse cover crops support ecological weed management in orchard cropping systems. *Renew. Agric. Food Syst.* 2024. № 38. e54.
32. Hussain S., Sharma M.K., War A.R., Hussain B. Weed management in apple cv. royal delicious by using different orchard floor management practices. *Int. J. Fruit. Sci.* 2020. № 20. P. 891–921.
33. Giacalone G., Peano C., Isocrono D., Sottile F. Are cover crops affecting the quality and sustainability of fruit production? *Agriculture*. 2021. № 11(12). DOI:10.3390/agriculture11121201
34. Manici L. M., Kelderer M., Caputo F., Nicoletti F., De Luca Picione F., Topp A. R. Impact of cover crop in pre-plant of apple orchards: relationship between crop health, root inhabiting fungi and rhizospheric bacteria. *Can. J. Plant Sci.* 2015. № 95. P. 947–958. DOI:10.4141/cjps-2015-013.
35. Chavarría D. N., Verdenelli R. A., Serri D. L., Restovich S. B., Andriulo A. E., Meriles J. M. et al. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. *Eur. J. Soil Biol.* 2016. № 76. P. 74–82. DOI:10.1016/j.ejsobi.2016.07.002.
36. Cao Q., Wang Z., Yang X., Shen Y. The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*. 2021. № 205. DOI:10.1016/j.still.2020.104788.
37. Capri C., Gatti M., Fiorini A., Ardenti F., Tabaglio V., Poni S. A Comparative study of fifteen cover crop species for orchard soil management: water uptake, root density traits and soil aggregate stability. *Sci. Rep.* 2023. № 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27915-7>.
38. Bałuszyńska U. B., Rowińska M., Licznar-Malańczuk M. Grass species as living mulches – comparison of weed populations and their biodiversity in apple tree rows and tractor alleys. *Acta Agrobot.* 2022. № 75. 758.
39. Licznar-Malanczuk M., Baluszynska U. B. Do living mulches or environmental conditions have a greater impact on the external quality of the apple fruit ‘Chopin’ cultivar? *Agriculture*. 2024. № 14(4). DOI:10.3390/agriculture14040610.
40. Wieczorek R., Zydlik Z., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A., Kayzer D. The effect of biofumigation on the microbiome composition in replanted soil in a fruit tree nursery. *Agronomy*. 2023. № 13(10). DOI:10.3390/agronomy13102507.
41. Yim B., Nitt H., Wrede A., Jacquiod S., Sørensen S.J., Winkelmann T., Smalla K. Effects of soil pre-treatment with Basamid® granules, Brassica juncea,

Raphanus sativus, and Tagetes patula on bacterial and fungal communities at two apple replant disease sites. *Front. Microbiol.* 2017. № 8. DOI:10.3389/fmicb.2017.01604.

42. Wieczorek R., Zydlik Z., Zydlik P. Biofumigation treatment using Tagetes patula, Sinapis alba and Raphanus sativus changes the biological properties of replanted soil in a fruit tree nursery. *Agriculture*. 2024. № 14(7). DOI:10.3390/agriculture14071023.

43. Furmanczyk E. M., Malusà E., Kozacki D., Tartanus M. Insights into the belowground biodiversity and soil nutrient status of an organic apple orchard as affected by living mulches. *Agriculture*. 2024. № 14(2). DOI:10.3390/agriculture14020293.

44. Warschefsky E. J., Klein L. L., Frank M. H., Chitwood D. H., Londo J. P., von Wettberg E. J., Miller A. J. Rootstocks: Diversity, domestication, and impacts on shoot phenotypes. *Trends Plant Sci.* 2016. № 21. P. 418–437.

45. Wang Y., Li W., Xu X., Qiu C., Wu T., Wei Q., Ma F., Han Z. Progress of apple rootstock breeding and its use. *Hortic. Plant J.* 2019. № 5. P. 183–191.

46. Li X., Wu Y., Huang C., Rahman Md.A., Argaman E., Xiao Y. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in the field promotes plant colonization rate and yield. *European Journal of Agronomy*. 2025. № 164. DOI:10.1016/j.eja.2024.127503.

47. Wang M., Xiang L., Tang W., Chen X., Li C., Yin C., Mao Z. Improving apple orchard health: The role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviating replant disease and strengthening soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*. 2024. № 196. DOI:10.1016/j.apsoil.2024.105278.

48. Zydlik Z., Zydlik P., Wieczorek R. The effects of bioinoculants based on mycorrhizal and Trichoderma spp. fungi in an apple tree nursery under replantation conditions. *Agronomy*. 2021. № 11(11). DOI:10.3390/agronomy11112355.

References:

1. Yakovenko, R. V. (2021). Replant disease and the practices to reduce it in the apple-tree orchards. *Bulletin of the Uman State University*, no. 2, pp. 69–72. DOI: 10.31395/2310-0478- 2021-2-69-72. [in Ukrainian].

2. Zydlik, Z., Zydlik, P., Jarosz, Z., Wieczorek, R. (2023). The use of organic additives for replanted soil in apple tree production in a fruit tree nursery. *Agriculture*, no. 13(5), 973. DOI: 10.3390/agriculture13050973.

3. Battacharyya, D., Babgohari, M. Z., Rathor, P., Prithiviraj, B. (2015). Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.*, no. 196, pp. 39–48. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.012.

4. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., et al. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.*, no. 196, pp. 15–27. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.013.

5. Soppelsa, S., Kelderer, M., Casera, C., et al. (2018). Use of biostimulants for organic apple production: effects on tree growth, yield, and fruit quality at harvest and during storage. *Front. Plant Sci.*, no. 9, 1342. DOI: 10.3389/fpls.2018.01342.

6. Yim, B., Hanschen, F. S., Wrede, A., et al. (2016). Effects of biofumigation using Brassica juncea and Raphanus sativus in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at

three field sites with replant disease. *Plant Soil*, no. 406, pp. 389–408. DOI: 10.1007/s11104-016-2876-3.

7. Gosnell, H. (2022). Regenerating soil, regenerating soul: an integral approach to understanding agricultural transformation. *Sustain. Sci.*, no. 17, pp. 603–620. DOI: 10.1007/s11625-021-00993-0.

8. Szczygieł, A. (2003). Soil fatigue in orchard. Part I. Owoce Warzywa Kwiaty, no. 13, pp. 16–17.

9. Kopytko, P. H., Yakovenko, R. V., Petryshyna, I. P. (2021). Organic substances replenishment and high humus content of soil in the apple orchards under different fertilization. *Collected Works of Uman National University of Horticulture*, no. 99(1), pp. 81–94. DOI: 10.31395/2415-8240-2021-99-1-81-94. [in Ukrainian].

10. Kopytko, P. H., Yakovenko, R. V. (2021). Soil conditions and yield of repeatedly grown apple orchard depending on longterm fertilizer application. *Collected Works of Uman National University of Horticulture*, no. 98(1), pp. 34–47. DOI: 10.31395/2415-8240-2021-98-1-34-47. [in Ukrainian].

11. Styła, K., Sawicka, A. (2010). Microbiological activity of soil against the background of differentiated irrigation and fertilization in apple (*Malus domestica*) orchard after replantation. *Agronomy Research*, no. 8(1), pp. 827–836.

12. Xiang, L., Wang, M., Jiang, W., et al. (2021). Key indicators for renewal and reconstruction of perennial trees soil: Microorganisms and phloridzin. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, no. 225, 112723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112723>

13. Liang, B., Ma, C., Fan, L., Wang, Y., Yuan, Y. (2018). Soil amendment alters soil physicochemical properties and bacterial community structure of a replanted apple orchard. *Microbiological Research*, no. 216, pp. 1–11.

14. Kai, T., Adhikari, D. (2021). Effect of organic and chemical fertilizer application on apple nutrient content and orchard soil condition. *Agriculture*, no. 11(4), 340. DOI: 10.3390/agriculture11040340

15. Chen, R., Jiang, W., Duan, Y., Qiao, H., Fan, H., Chen, X., Shen, X., Yin, C., Mao, Z. (2021). Effect of emerging soil chemical amendments on the replant soil environment and growth of *Malus hupehensis* Rehd. Seedlings. *ACS Omega*, no. 6(31), pp. 20445–20454. DOI: 10.1021/acsomega.1c02447

16. Teodoro, M., Trakal, L., Gallagher, B. N., Šimek, P., Soudek, P., Pohořelý, M., Beesley, L., Jačka, L., Kovář, M., Seyedsadr, S., Mohan, D. (2020). Application of co-composted biochar significantly improved plant-growth relevant physical/chemical properties of a metal contaminated soil. *Chemosphere*, no. 242, 125255. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125255

17. Jiang, W., Chen, R., Zhao, L., Qin, L., Fan, H., Chen, X., Wang, Y., Yin, C., Mao, Z. (2022). Chemical fumigants control apple replant disease: Microbial community structure-mediated inhibition of *Fusarium* and degradation of phenolic acids. *Journal of Hazardous Materials*, no. 440, 129786. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129786.

18. Nicola, L., Turco, E., Albanese, D., Donati, C., Thalheimer, M., Pindo, M., Insam, H., Cavalieri, D., Pertot, I. (2017). Fumigation with dazomet modifies soil microbiota in apple orchards affected by replant disease. *Appl. Soil Ecol.*, no. 113, pp. 71–79. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.02.002

19. Isaac Kwesi, O., Suresh, M., Jianping, L., Sreekantha, B. J. (2017). Chlorine dioxide oxidation of *Escherichia coli* in water – A study of the disinfection kinetics and mechanism. *J. Environ. Sci. Health*, no. 52, pp. 598–606.
20. Norio, O. (2007). Denaturation of protein by chlorine dioxide: oxidative modification of tryptophan and tyrosine residues. *Biochemistry*, no. 46, pp. 4898–4911.
21. Wang, G., Xie, Y., Lv, J., Zhang, S., Yin, C., Liu, Y., Mao, Z. (2025). Effects of soil disinfection using chlorine dioxide on soil fungal communities in apple replant fields and the growth of *Malus hupehensis* Rehd. Seedlings. *Agronomy*, no. 15(1), 59. DOI: 10.3390/agronomy15010059.
22. Wang, X., Li, K., Xu, S., Duan, Y., Wang, H., Yin, C., Chen, X., Mao, Z., Xiang, K. (2022). Effects of different forms of *Tagetes erecta* biofumigation on the growth of apple seedlings and replanted soil microbial environment. *Horticulturae*, no. 8, 633. DOI: 10.3390/horticulturae8070633.
23. Ji, Y., Zhang, Y., Fang, W., Li, Y., Yan, D., Cao, A., Wang, Q. (2024). A review of biofumigation effects with plant materials. *New Plant Prot.*, no. 1, e21. DOI: 10.1002/npp2.21.
24. Hanschen, F. S., Winkelmann, T. (2020). Biofumigation for fighting replant disease – a review. *Agronomy*, no. 10(3), 425. DOI: 10.3390/agronomy10030425.
25. DuPont, S. T., Hewavitharana, S. S., Mazzola, M. (2021). Field scale application of Brassica seed meal and anaerobic soil disinfestation for the control of apple replant disease. *Applied Soil Ecology*, no. 166, 104076. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.104076.
26. Dutta, T. K., Khan, M. R., Phani, V. (2019). Plant-parasitic nematode management via biofumigation using brassica and non-brassica plants: Current status and future prospects. *Curr. Plant Biol.*, no. 17, pp. 17–32.
27. Kanfra, X., Obawolu, T., Wrede, A., Strolka, B., Winkelmann, T., Hardeweg, B., Heuer, H. (2021). Alleviation of nematode-mediated apple replant disease by pre- cultivation of tagetes. *Horticulturae*, no. 7, 433. DOI: 10.3390/horticulturae7110433.
28. Morris, E. K., Fletcher, R., Veresoglou, S. D. (2020). Effective methods of biofumigation: A meta-analysis. *Plant and Soil*, no. 446(1-2), pp. 379–392. DOI: 10.1007/s11104-019-04352-y
29. Vliegen-Verschure, A. (2013). Fumigation using mustard seed meal instead of mustard. *EFM*, no. 2, pp. 6–7.
30. Brewer, M., Kanissery, R. G., Strauss, S. L., Kadyampakeni, D. M. (2023). Impact of cover cropping on temporal nutrient distribution and availability in the soil. *Horticulturae*, no. 9, 1160.
31. Haring, S., Gaudin, A. C. M., Hanson, B. D. (2024). Functionally diverse cover crops support ecological weed management in orchard cropping systems. *Renew. Agric. Food Syst.*, no. 38, e54.
32. Hussain, S., Sharma, M. K., War, A. R., Hussain, B. (2020). Weed management in apple cv. royal delicious by using different orchard floor management practices. *Int. J. Fruit. Sci.*, no. 20, pp. 891–921.
33. Giacalone, G., Peano, C., Isocrono, D., Sottile, F. (2021). Are cover crops affecting the quality and sustainability of fruit production? *Agriculture*, no. 11(12), 1201. DOI: 10.3390/agriculture11121201.

34. Manici, L. M., Kelderer, M., Caputo, F., Nicoletti, F., De Luca Picione, F., Topp, A. R. (2015). Impact of cover crop in pre-plant of apple orchards: relationship between crop health, root inhabiting fungi and rhizospheric bacteria. *Can. J. Plant Sci.*, no. 95, pp. 947–958. DOI: 10.4141/cjps-2015-013.
35. Chavarría, D. N., Verdenelli, R. A., Serri, D. L., Restovich, S. B., Andriulo, A. E., Meriles, J. M., et al. (2016). Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. *Eur. J. Soil Biol.*, no. 76, pp. 74–82. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2016.07.002.
36. Cao, Q., Wang, Z., Yang, X., Shen, Y. (2021). The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, no. 205, 104788. DOI: 10.1016/j.still.2020.104788.
37. Capri, C., Gatti, M., Fiorini, A., Ardeni, F., Tabaglio, V., Poni, S. (2023). A comparative study of fifteen cover crop species for orchard soil management: water uptake, root density traits and soil aggregate stability. *Sci. Rep.*, no. 13, 721.
38. Bałuszyńska, U. B., Rowińska, M., Licznar-Małańczuk, M. (2022). Grass species as living mulches – comparison of weed populations and their biodiversity in apple tree rows and tractor alleys. *Acta Agrobot.*, no. 75, 758.
39. Licznar-Malańczuk, M., Baluszynska, U. B. (2024). Do living mulches or environmental conditions have a greater impact on the external quality of the apple fruit ‘Chopin’ cultivar? *Agriculture*, no. 14(4), 610. DOI: 10.3390/agriculture14040610.
40. Wieczorek, R., Zydlik, Z., Wolna-Maruwka, A., Niewiadomska, A., Kayzer, D. (2023). The effect of biofumigation on the microbiome composition in replanted soil in a fruit tree nursery. *Agronomy*, no. 13(10), 2507. DOI: 10.3390/agronomy13102507.
41. Yim, B., Nitt, H., Wrede, A., Jacquioid, S., Sørensen, S. J., Winkelmann, T., Smalla, K. (2017). Effects of soil pre-treatment with Basamid® granules, Brassica juncea, Raphanus sativus, and Tagetes patula on bacterial and fungal communities at two apple replant disease sites. *Front. Microbiol.*, no. 8, 1604. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01604.
42. Wieczorek, R., Zydlik, Z., Zydlik, P. (2024). Biofumigation treatment using Tagetes patula, Sinapis alba and Raphanus sativus changes the biological properties of replanted soil in a fruit tree nursery. *Agriculture*, no. 14(7), 1023. DOI: 10.3390/agriculture14071023.
43. Furmanczyk, E. M., Malusà, E., Kozacki, D., Tartanus, M. (2024). Insights into the belowground biodiversity and soil nutrient status of an organic apple orchard as affected by living mulches. *Agriculture*, no. 14(2), 293. DOI: 10.3390/agriculture14020293.
44. Warschefsky, E. J., Klein, L. L., Frank, M. H., Chitwood, D. H., Londo, J. P., von Wettberg, E. J., Miller, A.J. (2016). Rootstocks: Diversity, domestication, and impacts on shoot phenotypes. *Trends Plant Sci.*, no. 21, pp. 418–437.
45. Wang, Y., Li, W., Xu, X., Qiu, C., Wu, T., Wei, Q., Ma, F., Han, Z. (2019). Progress of apple rootstock breeding and its use. *Hortic. Plant J.*, no. 5, pp. 183–191.
46. Li, X., Wu, Y., Huang, C., Rahman, Md. A., Argaman, E., Xiao, Y. (2025). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in the field promotes plant

colonization rate and yield. *European Journal of Agronomy*, no. 164, 127503. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127503

47. Wang, M., Xiang, L., Tang, W., Chen, X., Li, C., Yin, C., Mao, Z. (2024). Improving apple orchard health: The role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviating replant disease and strengthening soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, no. 196, 105278. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105278.

48. Zydlik, Z., Zydlik, P., Wieczorek, R. (2021). The effects of bioinoculants based on mycorrhizal and *Trichoderma* spp. fungi in an apple tree nursery under replantation conditions. *Agronomy*, no. 11(11), 2355. DOI: 10.3390/agronomy11112355.

Annotation

Synenko D. I., Demyanyuk O. S., Yakovenko R. V., Fomenko O. O.

Modern approaches to soil rehabilitation in the agroecosystem of an orchard

Goal. To analyze recent research findings on restoring the ecological state of soil in the agroecosystem of an apple orchard to mitigate the negative effects of soil fatigue.

Methods. The research methods included a systematic approach, comparative analysis, and generalization.

The results. The ecological condition of soil under perennial fruit plantations is a growing concern due to soil fatigue and replant disease. These phenomena lead to significant economic losses in horticulture, shorten the lifespan of newly established orchards, exacerbate environmental issues, and necessitate the development of effective and environmentally safe measures to improve soil health and phytosanitary conditions. This article reviews recent research findings on modern approaches to soil remediation in perennial fruit plantations. A thorough analysis of contemporary scientific literature indicates that soil fatigue and replant disease are multifaceted problems requiring integrated solutions. These solutions involve various soil disinfection techniques, biological strategies for regulating microbial communities, and the expansion of microbial and phytodiversity.

As a result, the agro-physical and biological properties of the soil are improved, leading to enhanced tree growth parameters and increased overall orchard productivity. Given that the microbiological composition of the soil plays a key role in the development of soil fatigue and replant disease – specifically, the accumulation of phytopathogenic fungi and shifts in the soil mycobiome – measures aimed at restoring soil microbiota and biological functions are of paramount importance. Among the most effective strategies for mitigating soil fatigue and replant disease is chemical soil disinfection. However, these methods are often economically burdensome and environmentally hazardous, prompting a growing shift toward alternative biological approaches. At the initial stage, soil disinfection should aim to reduce phytopathogenic microorganisms while preserving beneficial microbial species as much as possible. Subsequent stages should incorporate multiple biological strategies, including the use of rootstocks resistant to replant disease, the cultivation of specific plant species, and inoculation with beneficial microorganisms.

Key words: fruit plantations, soil remediation, soil fatigue, replant disease, soil microbiome, chemical disinfection, biological methods, biofumigation, inoculation.