

ГРИБНИЙ ПАТОГЕННИЙ КОМПЛЕКС ҐРУНТУ ЗА ТРИВАЛОГО ВИРОЩУВАННЯ ЯБЛУНІ

О. С. Дем'янюк, Д. І. Синенко

Інститут агроєкології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12; м. Київ, 03143, Україна; e-mail: demolena@ukr.net

Мета. Дослідити патогенний мікобіом темно-сірого опідзоленого ґрунту за тривалого вирощування яблуні. **Методи.** Облік та виділення мікроміцетів здійснювали за посіву водних розведень ґрунтової суспензії на сусло-агарове середовище. Ідентифікацію грибів проводили за наявними визначниками. Назви видів і родів, а також їхню номенклатуру подано за сучасними таксономічними системами та он-лайн базами *Mycobank* і *Index Fungorum* (<http://www.mycobank.org/>; <https://www.kew.org/kew-gardens>). Для візуалізації фітопатогенного мікобіому ґрунту, видів, які є унікальними для місць відбору проб, і тих, які є спільними, будували Венн-діаграму. **Результати.** Із шару ґрунту 0–100 см виділено та ідентифіковано 68 видів грибів, серед яких 19 видів (28 %) є фітопатогенними для плодових і польових культур. Структуру фітопатогенного мікобіому ґрунту формували види, які належали до 12 родів. Найбільшим видовим різноманіттям характеризувалися роди *Fusarium*, *Aspergillus* і *Ulocladium*, які сукупно займали 55 % у загальній структурі патогенного мікобіому. Серед виділених та ідентифікованих грибів *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum* spp. належать до найбільш небезпечних. Найбільша кількість фітопатогенних видів містилась у верхніх шарах ґрунту. З глибиною їх кількість зменшувалась і в шарі 80–100 см їх було вдвічі менше. Проте у загальній структурі мікобіому ґрунту відзначено збільшення частки фітопатогенних видів із глибиною. Найбільший відсоток фітопатогенних видів грибів виділяли на глибині 80–100 см і 60–80 см (43 % і 40 % відповідно). У верхньому шарі ґрунту (0–20 см) частка фітопатогенних видів становила 25 %, на глибині 20–40 см — 28 %. Видове різноманіття представників комплексу збудників кореневих хвороб (гнилі) яблуні представлено 7 видами із 6 родів, більшість із яких належить до факультативних паразитів. Найпоширенішими збудниками кореневих гнилей яблуні у всій дослідженій вибірці були види роду *Fusarium*. **Висновки.** Значна кількість фітопатогенних видів та широке видове різноманіття збудників кореневої гнилі свідчить про значні ризики розвитку мікозів в агроценозах яблуні. Це потребує застосування відповідних заходів покращення фітосанітарного стану ґрунту.

Ключові слова: комплекс мікроміцетів, фітопатогенні гриби, екологічний ризик, біологічна безпека.

Вступ. Здоров'я ґрунту є ключовим чинником, від якого залежить ефективність ведення сільського господарства і продовольча безпека всього світу [1]. Серед значного переліку показників, що визначають здоров'я і якість ґрунту, важливе місце має ґрунтове біорізноманіття та структура мікобіому, у т. ч. співвідношення патогенних і сапротрофних видів, спрямованість мікробіологічних процесів [2].

У складі ґрунтового мікобіому містяться різноманітні види мікроорганізмів, серед яких і фітопатогенні, які можуть тривалий час зберігатися у ґрунті, передаватися через ґрунт та інфікувати широкий спектр сільськогосподарських культур [3; 4]. Складність ґрунтового середовища, в якому містяться пропагули фітопатогенів, перешкоджає ефективному контролю збудників хвороб рослин, оскільки патогени здатні утворювати

структури виживання, адаптовані до суворих умов, які можуть виживати роками і у такий спосіб залишаються присутніми як джерело інфекції протягом тривалого часу [3; 5].

Фітопатогенні види, що передаються через ґрунт, можуть спричинити значні втрати врожаю польових, овочевих та фруктових культур [6]. Встановлено, що більшість серед агресивних фітопатогенів є ґрунтовими мікроміцетами, а за прогнозами, до 2050 року їх кількість та шкідлива дія зросте втричі в усьому світі [7]. Це визначає актуальність дослідження структури мікобіому ґрунтів агроценозів, біорізноманіття фітопатогенних видів та їхньої шкідливості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Царство грибів відкриває перед людством величезні можливості та виклики завдяки значній різноманітності, винятковій метаболічній активності та швидкій здатності змінюватися. Загальновідомо, що гриби підтримують багато важливих екосистемних процесів і функцій планетарного значення та необхідні для стійкого розвитку сільського господарства [8; 9]. Зокрема, забезпечують взаємодію рослин і ґрунту, зміцнення здоров'я рослин та їх живлення, стійкість рослин до стресових чинників тощо. У контексті сучасних екологічних викликів царство грибів також охоплює численні види з патогенним потенціалом, які становлять загрозу для різноманітних екосистем і людей [10]. На сьогодні визначено, що в усьому світі близько 8 тис. видів грибів є потенційними агентами хвороб рослин [11].

Сучасні системи сільського господарства, яким властива монокультура, інтенсивні технології з надмірним застосуванням пестицидів та агрохімікатів, а також глобалізовані ринки сприяють підвищенню агресивності та шкідливості фітопатогенів, появі та поширенню нових видів, зміні їхніх стратегій [12]. Це є важливим не лише з точки зору економічних збитків, а й загроз продовольчій та біологічній безпеці [13; 14].

Варто зазначити, що в природних екосистемах патогени відіграють важливу регуляторну роль, яка може змінювати такі взаємодії, як конкуренція чи динаміка «хижак-жертва», спричиняти каскадні ефекти в екологічних угрупованнях [15].

Дослідники зазначають про зростання протягом останніх двох десятиліть спалахів хвороб рослин, спричинених вірулентними

видами ооміцетів та мікроміцетів, а також частоту виникнення нових хвороб [12; 16; 17]. У зв'язку з важливістю точної діагностики хвороб рослин та їх збудників, впровадженням стратегій управління і контролю поширення хвороб міжнародне співтовариство приділяє значну увагу створенню баз даних для покращення ідентифікації, уніфікації найменування видів фітопатогенних грибів [18].

Фітопатогенні гриби можуть прямо чи опосередковано викликати значне зниження якості та кількості рослинної продукції як до, так і після збору врожаю. Було визначено 10 фітопатогенів грибної етіології, які завдають найбільшої економічної шкоди в усьому світі і широко розповсюджені в ґрунтах: 1) *Magnaporthe oryzae*; 2) *Botrytis cinerea*; 3) *Puccinia* spp.; 4) *Fusarium graminearum*; 5) *Fusarium oxysporum*; 6) *Blumeria graminis*; 7) *Mycosphaerella graminicola*; 8) *Colletotrichum* spp.; 9) *Ustilago maydis*; 10) *Melampsora lini* [19].

Серед хвороб плодів дерев найбільш небезпечними визнано кореневі гнилі грибної етіології, які здатні уражувати підщепи, молоді саджанці та ослаблені дерева [20], а також спричиняти специфічну хворобу пересадки дерев та ґрунтовому [21; 22]. Вважається, що у розвитку хвороби пересадки дерев серед біотичних чинників найбільше значення мають саме ґрунтові гриби родів *Cylindrocarpon*, *Rhizoctonia*, *Penicillium*, *Alternaria* [23]. Представники цих родів мають широку спеціалізацію і здатні уражувати різні види рослин, а тому становлять приховану небезпеку в агроекосистемах для інших культур. Так, наприклад, представники роду *Fusarium* повсюдно поширені в ґрунтах і більшість видів (наприклад, *F. oxysporum*, *F. fujikuroi*, *F. graminearum*) є збудниками хвороб економічно важливих культур, включно з зерновими, овочевими та плодово-ягідними культурами [19]. Інфекція на рослинах викликає різні хвороби, зокрема судинне в'янення, кореневу та стеблову гнилі, крону гниль, в'янення та рак [24]. Інші види фітопатогенів, такі як *Phoma* та *Colletotrichum* також доволі часто трапляються в ґрунтах агроекосистем, створюючи серйозну загрозу здоров'ю ґрунту та широкому спектру рослин [25; 26].

В агроекосистемах поширення і розвиток фітопатогенних грибів значною мірою

залежить від застосованих агрозаходів. Так, наприклад, неправильне використання та надмірне застосування пестицидів спричиняє формування резистентності у збудників хвороб, а також негативно впливає на корисні організми ґрунту та комах-запилювачів [27].

Аналіз результатів вітчизняних і закордонних публікацій показав, що більшість досліджень фітопатогенних мікобіомів ґрунтів та впливу різних сільськогосподарських практик на ґрунтові мікроорганізми зосереджені на польових культурах, тоді як ґрунтовим системам багаторічних плодкових насаджень приділяється менше уваги. Водночас виробництво яблук у світі та Україні постійно зростає, розширюються площі та закладаються нові інтенсивні сади [28], що потребує поглиблених досліджень екологічного і фітосанітарного стану та різних практик управління садами [29; 30].

Отже, моніторинг і контроль фітопатогенного фону, у т. ч. того, який формує мікобіота ґрунту, у багаторічних плодкових насадженнях заслуговує особливої уваги, оскільки це пов'язано не лише з отриманням високих урожаїв, але й з біологічною безпекою і здоров'ям людей.

У зв'язку з цим метою наших досліджень є визначення структури фітопатогенного мікобіому ґрунту за багаторічного вирощування яблуні в умовах центральної частини Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методи. Дослідження видової структури та чисельності фітопатогенних мікроміцетів у ґрунті проводили в багаторічних насадженнях яблуні Уманського національного університету садівництва, які розміщені на території Черкаської області.

Сад закладено в 1931 р. і впродовж 50-річного періоду там вирощували сильно-рослі дерева яблуні сорту Кальвіль сніговий на насіннєвій підщепі з площею живлення 10×10 м. У 1982 р. сад було реконструйовано, старі дерева викорчовано, а на їхньому місці у 1984 р. висаджено нові (силь-

норослі дерева сорту Кальвіль сніговий на насіннєвій підщепі, сорту Айдаред на насіннєвій підщепі і вегетативній М4 з площею живлення 7×5 м), зі збереженням попередніх ділянок досліджуваних варіантів. Утретє сад було реконструйовано шляхом викорчовування старих дерев у 2017 р. та висадження нових у 2018 р. зі збереженням попередніх ділянок досліджуваних варіантів, на яких посаджено дерева яблуні сорту Голден делішес і Гала на підщепі ММ.106 з площею живлення 5×2 м. Міжряддя в насадженнях утримують під чорним, а пристовбурні смуги — під гербіцидним паром (Раундап Макс, РК — д. р. гліфосату калійна сіль, 551 г/л). Дослідні насадження незрошувані.

Характеристику темно-сірого опідзоленого ґрунту наведено в табл. 1.

Зразки ґрунту для мікологічних досліджень відбирали з шарів 0–20 см, 20–40, 40–60, 60–80 і 80–100 см відповідно до ДСТУ ISO 10381-6-2015 [31].

Визначення кількісного та якісного складу мікроміцетів проводили загальноприйнятою в мікробіології методикою посіву водних розведень ґрунтової суспензії на суцільно-агарове середовище, тривалість культивування — 4–14 діб за температури 28 °С [32]. Ідентифікацію мікроміцетів проводили за відповідними визначниками. Назви видів і родів, а також їхню номенклатуру подано за сучасними таксономічними системами та онлайн-базами MycoBank і Index Fungorum (<http://www.mycobank.org/>; <https://www.kew.org/kew-gardens>). Визначали відсоток трапляння виду гриба залежно від глибини відбору проби ґрунту. Для візуалізації фітопатогенного мікобіому ґрунту, видів, які є унікальними для місць відбору проб, і тих, які є спільними, будували Венн-діаграму [33].

Математичне та статистичне опрацювання результатів виконували за використання програмного пакету Microsoft Excel.

Результати та їх обговорення. З темно-сірого опідзоленого ґрунту, де безперервно

Таблиця 1. Характеристика темно-сірого опідзоленого ґрунту

Шари ґрунту, см	рН	Вміст гумусу, %	C/N	N _{заг.}	P ₂ O ₅	K ₂ O
				мг/кг ґрунту		
0–20	5,2	2,41	4,2	13,4	184	289
20–40	5,3	2,23	4,1	12,9	146	274

понад 90 років вирощували яблуні, з різних шарів на глибину 1 м виділено та ідентифіковано 68 видів мікроміцетів, які належали до 22 родів двох відділів: *Zygomycota* (5 родів) та *Ascomycota* (17 родів).

У загальній структурі мікобіому ґрунту старого саду фітопатогенні гриби займали 28 %, умовно патогенні — 38 %, сапротрофи — 34 % (рис. 1). Значна частка фітопатогенних видів свідчить про високий ризик ураження ними яблуні, розповсюдження в агроєкосистемі та небезпеку для інших видів культур.

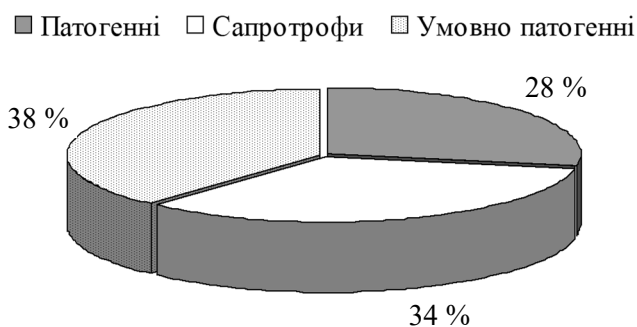


Рис. 1. Структура мікобіому темно-сірого опідзоленого ґрунту багаторічних насаджень яблуні (0–100 см), %.

Структуру патогенного мікобіому ґрунту старого саду формували 19 видів грибів, які належали до 12 родів (рис. 2). Найбільшим видовим різноманіттям характеризувалися роди *Fusarium*, *Aspergillus* і *Ulocladium*, які сукупно займали 55 % у загальній структурі фітопатогенного мікобіому.

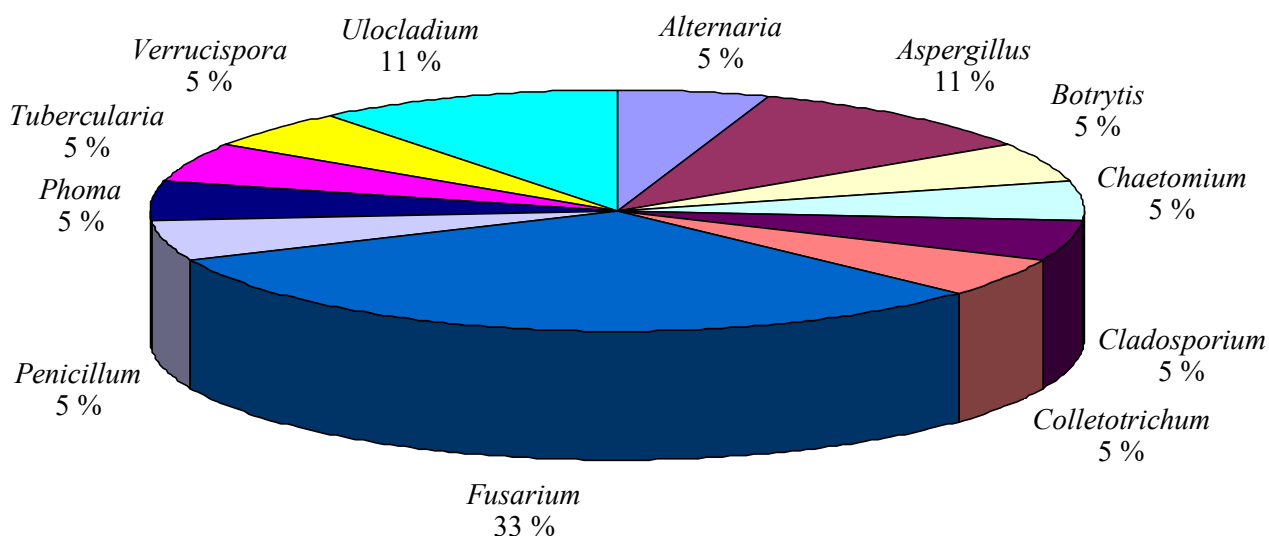


Рис. 2. Структура фітопатогенного мікобіому темно-сірого опідзоленого ґрунту багаторічних насаджень яблуні (0–100 см), %.

Серед виділених та ідентифікованих фітопатогенних мікроміцетів (табл. 2) три види належать до найбільш небезпечних, які завдають значної шкоди сільськогосподарським культурам [19], а саме: *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum* spp. Тому важливо контролювати чисельність цих збудників хвороб рослин та впроваджувати екологічно безпечні методи для зменшення їхньої шкідливої дії.

Як свідчать дані табл. 2, найбільша кількість фітопатогенних видів містилась у верхніх шарах ґрунту. З глибиною їх кількість зменшувалась і в шарі 80–100 см їх було вдвічі менше. Проте у загальній структурі мікобіому ґрунту відзначено тенденцію збільшення частки фітопатогенних видів із глибиною. Найбільший відсоток фітопатогенних видів грибів виділяли на глибині 80–100 см і 60–80 см (43 % і 40 % відповідно). У верхньому шарі ґрунту (0–20 см) частка фітопатогенних видів становила 25 %, на глибині 20–40 см — 28 %.

Визначено, що склад і частота трапляння патогенних видів були неоднорідними в різних шарах ґрунту.

Для візуалізації фітопатогенного мікобіому ґрунту загалом та видів, які є унікальними або спільними для різних шарів ґрунту було побудовано діаграму Венна. Як видно з рис. 3, *Fusarium oxysporum* Schlecht і *Fusarium* spp. були присутні в усіх шарах ґрунту. У шарах ґрунту 0–20 см та 40–60 см виявляли види, які були специфічними лише для

Таблиця 2. Фітопатогенні види грибів та частота їх трапляння на різній глибині відбору проб, %

Види	Глибина відбору проб ґрунту, см				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
<i>Alternaria alternate</i> (Fr.) Keissl	2,5	12,5	0,5	–	–
<i>Aspergillus niger</i> v. Tieghem	–	39,0	13,7	18,0	56,0
<i>A. flavus</i> Link	–	1,3	–	1,2	0,5
<i>Botrytis cinerea</i> Pers.	–	5,2	1,7	–	–
<i>Chaetomium homopilatum</i> Omvik	2,0	2,0	–	1,5	–
<i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link	12,5	7,5	0,5	–	–
<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> (Pens.) Sacc.	–	1,5	–	–	2,4
<i>Fusarium oxysporum</i> Schlecht	2,3	2,3	1,0	0,5	0,5
<i>F. lateritium</i> Ness	2,3	–	–	–	–
<i>F. proliferatum</i> (Sm.) Sacc.	–	–	0,7	–	–
<i>F. sambucinum</i> Fuskel	1,7	0,5	–	–	–
<i>F. solani</i> (Peck) Wollenw	0,2	1,0	0,5	0,5	–
<i>Fusarium</i> spp.	1,7	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Penicillium lanosum</i> Westling	12,0	–	1,2	12,7	0,7
<i>Phoma exigua</i> Desmazieres	1,0	5,2	1,7	–	–
<i>Tubercularia</i> spp.	0,1	7,1	–	–	–
<i>Verrucispora proteacearum</i> Shaw & Alcorn	3,4	–	–	–	–
<i>Ulocladium</i> spp.	2,7	7,3	0,3	–	–
<i>U. consortiale</i> (Thum) E. G. Simmons	–	1,5	0,7	0,5	–
Кількість видів	13	15	12	8	6

цих зон — відповідно *F. lateritium* Ness і *Verrucispora proteacearum* Shaw & Alcorn та *F. proliferatum* (Sm.) Sacc. і не траплялись в інших шарах ґрунту.

Видове різноманіття представників комплексу збудників кореневих хвороб (гнилі) яблуні було представлено 7 видами із 6 родів. Більшість збудників кореневих гнилей належить до факультативних паразитів, які зберігаються на рослинних залишках або безпосередньо в ґрунті, тому їхній життєвий цикл дуже тісно пов'язаний з ним.

Найпоширенішими збудниками кореневих гнилей яблуні у всій дослідженій вибірці були види роду *Fusarium*. Варто зазначити, що види *Fusarium oxysporum* [34; 35] і *Alternaria alternate* [35] пов'язані з кореневою

гниллю саджанців та молодих яблунь, а вид *F. proliferatum* [36] — із хворобою пересадки яблуні, що є небезпечним за подальшої реконструкції старого саду і висаджування саджанців.

Ґрунтові мікроміцети роду *Cladosporium* представлені трьома видами, серед яких вид *Colletotrichum gloeosporioides* є космополітичним патогеном і завдає шкоди багатьом сільськогосподарським культурам, зокрема є збудником антракнозу, викликає гірку гниль яблук [37; 38]. Серед інших патогенів такі види, як *Botrytis cinerea* Pers., *Alternaria alternate* (Fr.) Keissl, *Colletotrichum gloeosporioides* (Pens.) Sacc, *Fusarium* spp., *Aspergillus niger* є збудниками гнилей плодів яблук та інших плодових культур [39–41].

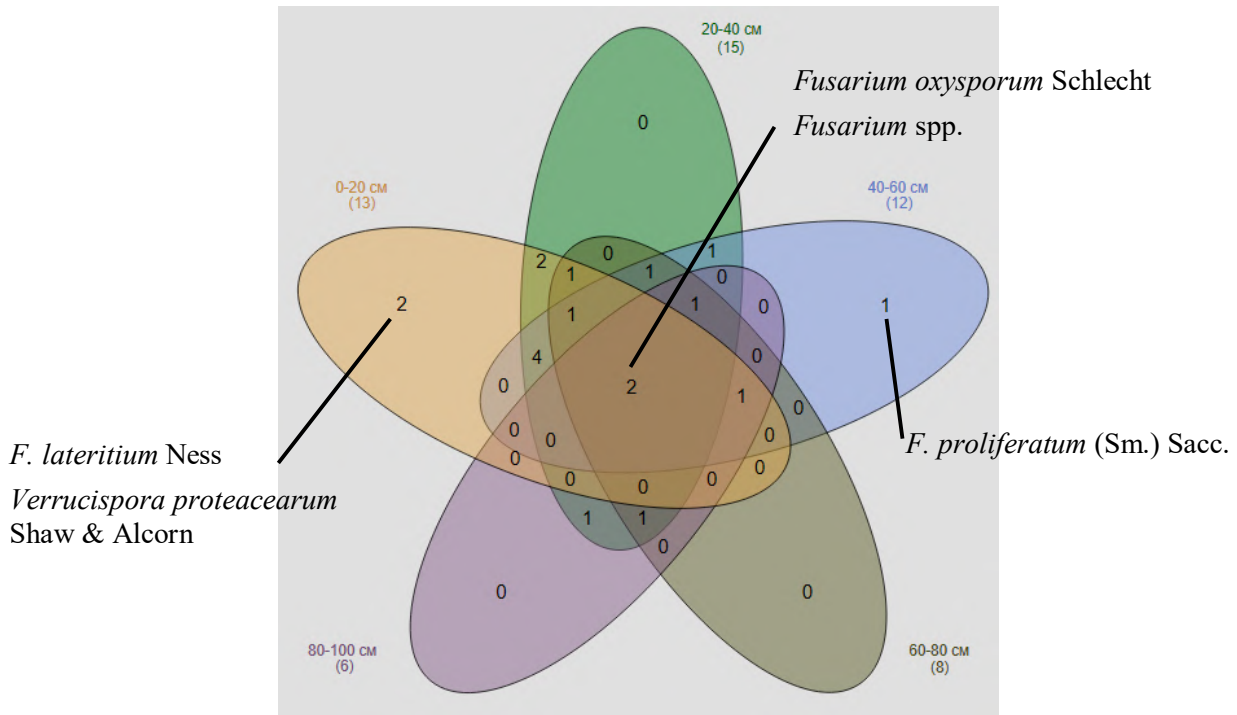


Рис. 3. Діаграма Венна фітопатогенного мікобіому ґрунту.

У ґрунті досліджуваного саду вид *Aspergillus niger* v. Tieghem займає панівне положення навіть на глибині 80–100 см (табл. 2, рис. 4).

Цей вид із частотою трапляння 39 % виявлено у верхньому горизонті ґрунту, на глибині 20–40 см та 40–60 см відсоток виду знизився майже вдвічі (до 13,7 % та 18,0 %),

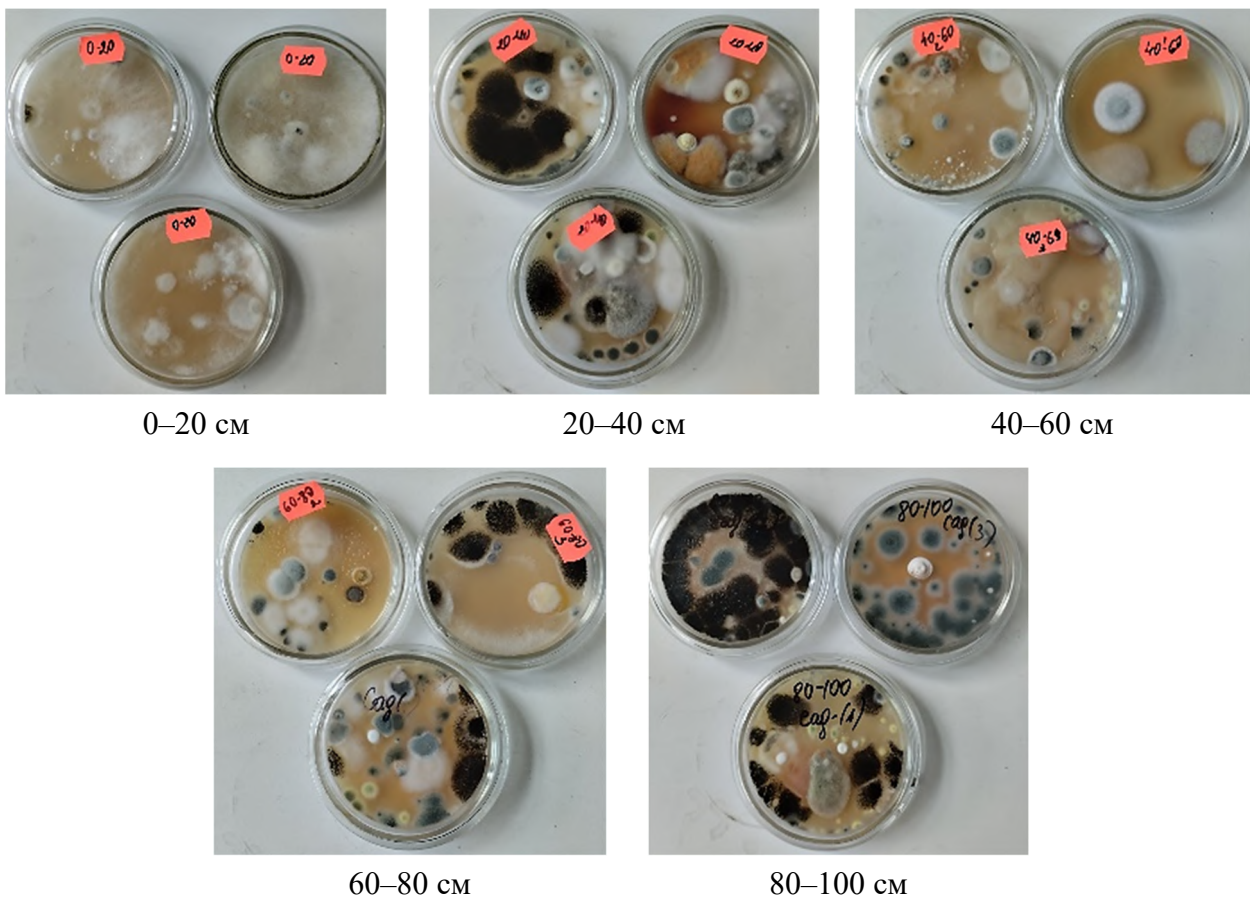


Рис. 4. Колонії грибів, виділених із різних шарів ґрунту, 7-ма доба культивування.

але на глибині 80–100 см частота трапляння виду зросла до 56 %.

Висновки. Мікобіом ґрунту, в якому понад 90 років вирощували яблуні, характеризується значною кількістю фітопатогенних видів та широким видовим різноманіттям збудників кореневих гнилей, що свідчить про високий ризик розвитку мікозів та необхідність застосування відповідних заходів поліпшення фітосанітарного стану ґрунту.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Tahat M. M., Alananbeh K. M., Othman Y. A., Leskovar D. I. Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, № 12. 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>
2. Demyanyuk O., Symochko L., Mostoviak I. Soil microbial diversity and activity in different climatic zones of Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2020. Vol. 11, № 2. P. 338–343. <https://doi.org/10.15421/022051>
3. Du S., Trivedi P., Wei Z., Feng J., Hu H.-W., Bi L. ... Liu Y.-R. The Proportion of Soil-Borne Fungal Pathogens Increases with Elevated Organic Carbon in Agricultural Soils. *mSystems*. 2022. Vol. 7, № 2. E0133721. <https://doi.org/10.1128/mSystems.01337-21>
4. Schertler A., Lenzner B., Dullinger S., Moser D., Bufford J. L., Ghelardini L. ... Essl F. Biogeography and global flows of 100 major alien fungal and fungus-like oomycete pathogens. *Journal of Biogeography*. 2023. P. 1–19. <https://doi.org/10.1111/jbi.14755>
5. Möller M., Stukenbrock E. H. Evolution and genome architecture in fungal plant pathogens. *Nat Rev Microbiol*. 2017. Vol. 15. P. 756–771. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.76>
6. Zhang W. Global pesticide use: profile, trend, cost/benefit and more. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 8. P. 1–27.
7. Delgado-Baquerizo M., Guerra C. A., Cano-Díaz C., Egidi E., Wang J.-T., Eisenhauer N. ... Maestre F. T. The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale. *Nat Clim Chang*. 2020. Vol. 10. P. 550–554. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3>
8. Fernandes M. L. P., Bastida F., Jehmlich N., Martinović T., Větrovský T., Baldrian P. ... Starke R. Functional soil mycobiome across ecosystems. *J. Proteome*. 2022. Vol. 252. 104428. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2021.104428>
9. Fraç M., Hannula E. S., Bełka M., Salles J. F., Jedryczka M. Soil mycobiome in sustainable agriculture. *Front. Microbiol*. 2022. Vol. 13. 1033824. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1033824>
10. Fisher M. C., Gurr S. J., Cuomo C. A., Blehert D. S., Jin H., Stukenbrock E. H. ... Cowen L. E. Threats Posed by the Fungal Kingdom to Humans, Wildlife, and Agriculture. *mBio*. 2020. Vol. 11, № 3. E00449-20. <https://doi.org/10.1128/mBio.00449-20>
11. Jayawardena R. S., Hyde K. D., de Fari-as A. R. G., Bhunjun C. S., Fernandez H. S., Manamgoda D. S. ... Thines M. What is a species in fungal plant pathogens? *Fungal Diversity*. 2021. Vol. 109, № 1. P. 239–266. <https://doi.org/10.1007/s13225-021-00484-8>
12. Fones H. N., Bebbler D. P., Chaloner T. M., Kay W. T., Steinberg G., Gurr S. J. Threats to global food security from emerging fungal and oomycete crop pathogens. *Nature Food*. 2020. Vol. 1, № 6. P. 332–342. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0075-0>
13. Bebbler D. P., Gurr S. J. Crop-destroying fungal and oomycete pathogens challenge food security. *Fungal Genet Biol*. 2015. Vol. 74. P. 62–64. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2014.10.012>
14. Savary S., Willocquet L., Pethybridge S. J., Esker P., McRoberts N., Nelson A. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol*. 2019. Vol. 3. P. 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
15. Hatcher M. J., Dunn A. M. Parasites in ecological communities: From interactions to ecosystems. Cambridge University Press. 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511987359>
16. Fisher M. C., Henk D. A., Briggs C. J., Brownstein J. S., Madoff L. C., McCraw S. L., Gurr S. J. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*. 2012. Vol. 484. P. 186–194. <https://doi.org/10.1038/nature10947>
17. Almeida R. P. P. Emerging plant disease epidemics: Biological research is key but not enough. *PLoS Biol*. 2018. Vol. 16. E2007020. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2007020>
18. Crous P. W., Rossman A. Y., Aime M. C., Allen W. C., Burgess T., Groenewald J. Z., Castlebury L. A. Names of Phytopathogenic Fungi: A Practical Guide. *Phytopathology*. 2021. Vol. 111, № 9. P. 1500–1508. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-20-0512-PER>
19. Dean R., van Kan J. A. L., Pretorius Z. A., Hammond-Kosack K. E., di Pietro A. ... Foster G. D. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol Plant Pathol*. 2012. Vol. 13, № 4. P. 414–430. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>
20. Bodah E. Root rot diseases in plants: a review of common causal agents and management strategies. *Agri Res Tech*. 2017. Vol. 5, № 3. P. 555–661. <http://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.05.555661>
21. Winkelmann T., Smalla K., Amelung W., Babab G., Grunewaldt-Stöcker G., Kanfra X. ... Schlotter M. Apple Replant Disease: Causes and Mitiga-

- tion Strategies. *Curr. Issues Mol. Biol.* 2019. Vol. 30. P. 89–106. <http://doi.org/10.21775/cimb.030.089>
22. Яковенко Р. В., Дем'янюк О. С., Синенко Д. І., Чепурний В. Г., Лисанюк В. Г. Проблема ґрунтовтоми в монокультурі яблуні. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 3. С. 121–128. <http://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2023.287826>
23. Sobiczewski P., Treder W., Bryk H., Klamkowski K., Krzewińska D., Mikiciński A. ... Tryngiel-Gač A. The impact of phytosanitary treatments in the soil with signs of fatigue on the growth of apple seedlings and populations of bacteria and fungi. *Polish Journal of Agronomy*. 2018. Vol. 34. P. 11–12. <http://doi.org/10.26114/pja.iung.361.2018.34.02>
24. Summerell B. A., Salleh B., Leslie J. F. A utilitarian approach to Fusarium identification. *Plant Dis.* 2003. Vol. 87. P. 117–128. <http://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.2.117>
25. Deb D., Khan A., Dey N. Phoma diseases: Epidemiology and control. *Plant Pathology*. 2020. Vol. 69, № 7. P. 1203–1217. <https://doi.org/10.1111/ppa.13221>
26. Khodadadi F., Santander R. D., McHenry D. J., Jurick W. M., Acimović S. G. A Bitter, Complex Problem: Causal Colletotrichum Species in Virginia Orchards and Apple Fruit Susceptibility. *Plant Disease*. 2023. Vol. 107, № 10. P. 3164–3175. <http://doi.org/10.1094/PDIS-12-22-2947-RE>
27. Hollomon W. Fungicide Resistance: Facing the Challenge Derek. *Plant Protect. Sci.* 2015. Vol. 51, № 4. P. 170–176. <http://doi.org/10.17221/42/2015-PPS>
28. O'Rourke D. Economic importance of the World apple industry. *Compendium of Plant Genomes*. 2021. P. 1–18. http://doi.org/10.1007/978-3-030-74682-7_1
29. Lee S. I., Cho G., Kim S.-H., Kim D.-R., Kwak Y.-S. Mycobiota community and fungal species response to development stage and fire blight disease in apples. *AIMS Microbiology*. 2023. Vol. 9, № 3. P. 554–569. <http://doi.org/10.3934/microbiol.2023029>
30. Van Geel M., Verbruggen E., De Beenhouwer M., van Rennes G., Lievens B., Honnay O. High soil phosphorus levels overrule the potential benefits of organic farming on arbuscular mycorrhizal diversity in northern vineyards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2017. Vol. 248. P. 144–152. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.017>
31. ДСТУ ISO 10381-6:2015. Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 6. Настанови з відбирання, оброблення та зберігання ґрунту в аеробних умовах для лабораторного оцінювання мікробіологічних процесів, біомаси та різноманіття (ISO 10381-6:2009, IDT) [Чинний від 2016-04-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2017. 12 с.
32. Експериментальна ґрунтова мікробіологія: монографія / В. В. Волкогон, О. В. Надкернична, Л. М. Токмакова та ін.: за ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
33. Heberle H., Meirelles G. V., da Silva F. R., Telles G. P., Minghim R. InteractiVenn: a web-based tool for the analysis of sets through Venn diagrams. *BMC Bioinformatics*, 2015. Vol. 16. 169. <http://doi.org/10.1186/s12859-015-0611-3>
34. Tewoldemedhin Y., Mazzola M., Botha W. J., Spies C. F. J., McLeod A. Characterization of fungi (Fusarium and Rhizoctonia) and oomycetes (Phytophthora and Pythium) associated with apple orchards in South Africa. *European Journal of Plant Pathology*. 2011. Vol. 130, № 2. P. 215–229. <http://doi.org/10.1007/s10658-011-9747-9>
35. Ruiz-Cisneros M. F., Rios-Velasco C., Berlanga-Reyes D. I., Ornelas-Paz J. J., Acosta-Muñiz C. H., Romo-Chacón A. ... Fernández-Pavía S. P. Incidence and causal agents of root diseases and its antagonists in apple orchards of Chihuahua, México. *Rev. Mex. Fitopatol.* 2017. Vol. 35, № 3. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1704-3>
36. Duan Y. N., Jiang W. T., Zhang R., Chen R., Chen X. S., Yin C. M., Mao Z. Q. Discovery of Fusarium proliferatum f. sp. Malus domestica Causing Apple Replant Disease in China. *Plant Disease*. 2022. Vol. 106, № 11. P. 2958–2966. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2802-RE>
37. Sharma M., Kulshrestha S. Colletotrichum gloeosporioides: An Anthracnose Causing Pathogen of Fruits and Vegetables. *Biotechnology Research Asia*. 2015. Vol. 12, № 2. P. 1233–1246. <https://doi.org/10.13005/bbra/1776>
38. Khodadadi F., González J. B., Martin P. L., Giroux E., Bilodeau G. J., Peter K. A. ... Acimović S. G. Identification and Characterization of Colletotrichum Species Causing Apple Bitter Rot in New York and Description of C. Noveboracense sp. *Nov. Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. 11043. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66761-9>
39. Nybom H., Ahmadi-Afzadi M., Rumpunen K., Tahir I. Review of the impact of apple fruit ripening texture and chemical contents on genetically determined susceptibility to storage rots. *Plants*. 2020. Vol. 9. 831. <https://doi.org/10.3390/plants9070831>
40. Ni W., Zhu L., Sha R., Tao J., Cai B., Wang S. Comparative iTRAQ proteomic profiling of susceptible and resistant apple cultivars infected by Alternaria alternata apple pathotype. *Tree Genet. Genomes*. 2017. Vol. 13. 23. <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1104-5>
41. Kumpoun W., Motomura Y., Harada Y. Inhibition of Aspergillus rot by sorbitol in apple fruit with watercore symptoms. *Postharvest Biol. Technol.* 2003. Vol. 29, № 2. P. 121–127. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00249-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00249-1)

Отримано 10.04.2024

FUNGAL PATHOGENIC SOIL COMPLEX UPON LONG-TERM CULTIVATION OF APPLE TREES

O. S. Demianiuk, D. I. Synenko

Institute of Agroecology and Environmental Management, NAAS, Kyiv
e-mail: demolena@ukr.net

Objective. Study the pathogenic mycobiome of dark grey podzolized soil upon long-term cultivation of apple trees. **Methods.** Accounting and isolation of micromycetes was carried out by inoculating aqueous dilutions of the soil suspension on wort agar. The identification of fungi was carried out according to the available parameters. The names of species and genera, as well as their nomenclature, are provided according to modern taxonomic systems and online databases MycoBank and Index Fungorum (<http://www.mycobank.org/>; <https://www.kew.org/kew-gardens>). A Venn diagram was plotted to visualize the phytopathogenic soil mycobiome for both species unique to sampling sites and those shared. **Results.** From 0 to 100 cm soil layer, 68 fungal species were isolated and identified, among which 19 species (28 %) are phytopathogenic for fruit and field crops. The structure of phytopathogenic soil mycobiome was formed by species belonging to 12 genera. The genera *Fusarium*, *Aspergillus* and *Ulocladium* were characterized by the greatest species diversity, which together accounted for 55 % of the total structure of the pathogenic mycobiome. Among the isolated and identified fungi, *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum* spp. are the most dangerous. The largest number of phytopathogenic species was contained in the upper layers of the soil. Their number decreased with depth, and in 80 to 100 cm layer there were half as many. However, in the general structure of the soil mycobiome, an increase in the share of phytopathogenic species with depth was registered. The highest percentage of phytopathogenic fungal species was isolated at a depth of 80 to 100 cm and 60 to 80 cm (43 % and 40 %, respectively). In the upper soil layer (0 to 20 cm), the share of phytopathogenic species was 25 %, and at a depth of 20 to 40 cm — 28 %. The species diversity of representatives of the complex of causative agents of root diseases (rot) of apple trees is represented by 7 species from 6 genera, most of which belong to facultative parasites. The most common causative agents of root rot of apple trees in the entire studied sample were species of the genus *Fusarium*. **Conclusion.** A significant number of phytopathogenic species and a wide variety of root rot pathogens indicate significant risks of mycosis development in apple agrocenoses. Appropriate measures are required to improve the phytosanitary condition of the soil.

Key words: micromycete complex, phytopathogenic fungi, environmental risk, biosafety.

REFERENCES

1. Tahat, M. M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. I. (2020). Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12 (12), 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>
2. Demyanyuk, O., Symochko, L., & Mostoviak, I. (2020). Soil microbial diversity and activity in different climatic zones of Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 11 (2), 338–343. <https://doi.org/10.15421/022051>
3. Du, S., Trivedi, P., Wei, Z., Feng, J., Hu, H.-W., Bi, L. ... Liu, Y.-R. (2022). The Proportion of Soil-Borne Fungal Pathogens Increases with Elevated Organic Carbon in Agricultural Soils. *mSystems*, 7 (2), e0133721. <https://doi.org/10.1128/msystems.01337-21>
4. Schertler, A., Lenzner, B., Dullinger, S., Moser, D., Bufford, J. L., Ghelardini, L. ... Essl, F. (2023). Biogeography and global flows of 100 major alien fungal and fungus-like oomycete pathogens. *Journal of Biogeography*, 1–19. <https://doi.org/10.1111/jbi.14755>
5. Möller, M., & Stukenbrock, E. H. (2017). Evolution and genome architecture in fungal plant pathogens. *Nat Rev Microbiol*, 15, 756–771. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.76>
6. Zhang, W. (2018). Global pesticide use: profile, trend, cost/benefit and more. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 8, 1–27.
7. Delgado-Baquerizo, M., Guerra, C. A., Cano-Díaz, C., Egidi, E., Wang, J.-T., Eisenhauer, N. ...

- Maestre, F. T. (2020). The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale. *Nat Clim Chang*, *10*, 550–554. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3>
8. Fernandes, M. L. P., Bastida, F., Jehmlich, N., Martinović, T., Větrovský, T., Baldrian, P. ... Starke, R. (2022). Functional soil microbiome across ecosystems. *J. Proteome*, *252*, 104428. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2021.104428>
9. Fraç, M., Hannula, E. S., Bełka, M., Salles, J. F., & Jedryczka, M. (2022). Soil microbiome in sustainable agriculture. *Front. Microbiol*, *13*, 1033824. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1033824>
10. Fisher, M. C., Gurr, S. J., Cuomo, C. A., Blehert, D. S., Jin, H., Stukenbrock, E. H. ... Cowen, L. E. (2020). Threats Posed by the Fungal Kingdom to Humans, Wildlife, and Agriculture. *mBio*, *11* (3), e00449-20. <https://doi.org/10.1128/mBio.00449-20>
11. Jayawardena, R. S., Hyde, K. D., de Fariás, A. R. G., Bhunjun, C. S., Fernandez, H. S., Manamgoda, D. S. ... Thines, M. (2021). What is a species in fungal plant pathogens? *Fungal Diversity*, *109* (1), 239–266. <https://doi.org/10.1007/s13225-021-00484-8>
12. Fones, H. N., Bebbler, D. P., Chaloner, T. M., Kay, W. T., Steinberg, G., & Gurr, S. J. (2020). Threats to global food security from emerging fungal and oomycete crop pathogens. *Nature Food*, *1* (6), 332–342. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0075-0>
13. Bebbler, D. P., & Gurr, S. J. (2015). Crop-destroying fungal and oomycete pathogens challenge food security. *Fungal Genet Biol*, *74*, 62–64. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2014.10.012>
14. Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol*, *3*, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
15. Hatcher, M. J., & Dunn, A. M. (2011). Parasites in ecological communities: From interactions to ecosystems. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511987359>
16. Fisher, M. C., Henk, D. A., Briggs, C. J., Brownstein, J. S., Madoff, L. C., McCraw, S. L., & Gurr, S. J. (2012). Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*, *484*, 186–194. <https://doi.org/10.1038/nature10947>
17. Almeida, R. P. P. (2018). Emerging plant disease epidemics: Biological research is key but not enough. *PLoS Biol*, *16*, e2007020. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2007020>
18. Crous, P. W., Rossman, A. Y., Aime, M. C., Allen, W. C., Burgess, T., Groenewald, J. Z., & Castlebury, L. A. (2021). Names of Phytopathogenic Fungi: A Practical Guide. *Phytopathology*, *111* (9), 1500–1508. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-20-0512-PER>
19. Dean, R., van Kan, J. A. L., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., di Pietro, A. ... Foster, G. D. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol Plant Pathol*, *13* (4), 414–430. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>
20. Bodah, E. (2017). Root rot diseases in plants: a review of common causal agents and management strategies. *Agri Res Tech*, *5* (3), 555–661. <http://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.05.555661>
21. Winkelmann, T., Smalla, K., Amelung, W., Baab, G., Grunewaldt-Stöcker, G., Kanfra, X. ... Schloter, M. (2019). Apple Replant Disease: Causes and Mitigation Strategies. *Curr. Issues Mol. Biol.*, *30*, 89–106. <https://doi.org/10.21775/cimb.030.089>
22. Yakovenko, R., Demyanyuk, O., Synenko, D., Chepurnyi, V., & Lysanyuk, V. (2023). Problema gruntovtomy v monokulturi yabluni [The problem of soil fatigue in apple orchards monoculture]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia — Balanced nature using*, *3*, 121–128. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2023.287826> [in Ukrainian].
23. Sobiczewski, P., Treder, W., Bryk, H., Klamkowski, K., Krzewińska, D., Mikiciński, A. ... Tryngiel-Gač, A. (2018). The impact of phytosanitary treatments in the soil with signs of fatigue on the growth of apple seedlings and populations of bacteria and fungi. *Polish Journal of Agronomy*, *34*, 11–12. <https://doi.org/10.26114/pja.iung.361.2018.34.02>
24. Summerell, B. A., Salleh, B., & Leslie, J. F. (2003). A utilitarian approach to Fusarium identification. *Plant Dis*, *87*, 117–128. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.2.117>
25. Deb, D., Khan, A., & Dey, N. (2020). Phoma diseases: Epidemiology and control. *Plant Pathology*, *69* (7), 1203–1217. <https://doi.org/10.1111/ppa.13221>
26. Khodadadi, F., Santander, R. D., McHenry, D. J., Jurick, W. M., & Aćimović, S. G. (2023). A Bitter, Complex Problem: Causal Colletotrichum Species in Virginia Orchards and Apple Fruit Susceptibility. *Plant Disease*, *107* (10), 3164–3175. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-22-2947-RE>
27. Hollomon, W. (2015). Fungicide Resistance: Facing the Challenge Derek. *Plant Protect. Sci.*, *51* (4), 170–176. <https://doi.org/10.17221/42/2015-PPS>
28. O'Rourke, D. (2021). Economic importance of the World apple industry. *Compendium of Plant Genomes*, 1–18. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74682-7_1
29. Lee, S. I., Cho, G., Kim, S.-H., Kim, D.-R., & Kwak, Y.-S. (2023). Microbiota community and fungal species response to development stage and fire blight disease in apples. *AIMS Microbiology*, *9* (3), 554–569. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2023029>

30. Van Geel, M., Verbruggen, E., De Beenhouwer, M., van Rennes, G., Lievens, B., & Honnay, O. (2017). High soil phosphorus levels overrule the potential benefits of organic farming on arbuscular mycorrhizal diversity in northern vineyards. *Agric. Ecosyst. Environ.*, *248*, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.017>
31. DSTU ISO 10381-6-2015 (2017). Yakist gruntu. Vidbyrannia prob. Chastyna 6. Nastanovy z vidbyrannia, obroblennia ta zberihannia gruntu v aerobnykh umovakh dlia laboratornoho otsiniuvannia mikrobiolohichnykh protsesiv, biomasy ta riznomanittia (ISO 10381-6:2009, IDT) [Soil quality. Sampling. Part 6: Guidance on the collection, handling and storage of soil under aerobic conditions for the assessment of microbiological processes, biomass and diversity in the laboratory]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
32. Volkohon, V. V. (Ed.), Nadkernychna, O. V., Tokmakova, L. M. et al. (2010). *Eksperymentalna gruntova mikrobiolohiia: monohrafiia [Experimental Soil Microbiology: monograph]*. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
33. Heberle, H., Meirelles, G. V., da Silva, F. R., Telles, G. P., & Minghim, R. (2015). InteractiVenn: a web-based tool for the analysis of sets through Venn diagrams. *BMC Bioinformatics*, *16*, 169. <https://doi.org/10.1186/s12859-015-0611-3>
34. Tewoldemedhin, Y., Mazzola, M., Botha, W. J., Spies, C. F. J., & McLeod, A. (2011). Characterization of fungi (*Fusarium* and *Rhizoctonia*) and oomycetes (*Phytophthora* and *Pythium*) associated with apple orchards in South Africa. *European Journal of Plant Pathology*, *130* (2), 215–229. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9747-9>
35. Ruiz-Cisneros, M. F., Rios-Velasco, C., Berlanga-Reyes, D. I., Ornelas-Paz, J. J., Acosta-Muñiz, C. H., Romo-Chacón, A. ... Fernández-Pavía, S. P. (2017). Incidence and causal agents of root diseases and its antagonists in apple orchards of Chihuahua, México. *Rev. Mex. Fitopatol.*, *35* (3). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1704-3>
36. Duan, Y. N., Jiang, W. T., Zhang, R., Chen, R., Chen, X. S., Yin, C. M., & Mao, Z. Q. (2022). Discovery of *Fusarium proliferatum* f. sp. *Malus domestica* Causing Apple Replant Disease in China. *Plant Disease*, *106* (11), 2958–2966. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-21-2802-RE>
37. Sharma, M., & Kulshrestha, S. (2015). *Colletotrichum gloeosporioides*: An Anthracnose Causing Pathogen of Fruits and Vegetables. *Biotechnology Research Asia*, *12* (2), 1233–1246. <https://doi.org/10.13005/bbra/1776>
38. Khodadadi, F., González, J. B., Martin, P. L., Giroux, E., Bilodeau, G. J., Peter, K. A. ... Aćimović, S. G. (2020). Identification and Characterization of *Colletotrichum* Species Causing Apple Bitter Rot in New York and Description of *C. Noveboracense* sp. *Nov. Sci. Rep.*, *10*, 11043. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66761-9>
39. Nybom, H., Ahmadi-Afzadi, M., Rumpunen, K., & Tahir, I. (2020). Review of the impact of apple fruit ripening texture and chemical contents on genetically determined susceptibility to storage rots. *Plants*, *9*, 831. <https://doi.org/10.3390/plants9070831>
40. Ni, W., Zhu, L., Sha, R., Tao, J., Cai, B., & Wang, S. (2017). Comparative iTRAQ proteomic profiling of susceptible and resistant apple cultivars infected by *Alternaria alternata* apple pathotype. *Tree Genet. Genomes*, *13*, 23. <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1104-5>
41. Kumpoun, W., Motomura, Y., & Harada, Y. (2003). Inhibition of *Aspergillus* rot by sorbitol in apple fruit with watercore symptoms. *Postharvest Biol. Technol.*, *29* (2), 121–127. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00249-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00249-1)

Received 10.04.2024