

Т. І. Тугай^{1,2,*}, А. В. Тугай^{1,2}, В. О. Желтоножський³, О. М. Юрьєва²,
Л. Т. Наконечна², Л. В. Садовніков³, Н. М. Сергійчук¹, О. Б. Поліщук⁴

¹ Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна

² Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України, Київ, Україна

³ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

⁴ Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

*Відповідальний автор: tatyanatugay2@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ АНТАГОНІСТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ШТАМІВ *TRICHODERMA* SPP., ЩО ВИДІЛЕНІ ЗІ СТАЦІОНАРІВ З РІЗНИМ РІВНЕМ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС ПО ВІДНОШЕННЮ ДО ФІТОПАТОГЕННИХ ГІФАЛЬНИХ ГРИБІВ

Проведено радіометричний аналіз зразків ґрунту з досліджуваних стаціонарів зони відчуження, що знаходяться під впливом хронічного опромінення понад три десятиліття, з яких були виділені мікроміцети різних видів роду *Trichoderma* і досліджено їхню біологічну активність. Показано, що швидкість радіального росту цих грибів перевищує середні показники для видів цього роду. Встановлено, що виділені штами видів *T. koningi* та *T. atroviride* мають дуже високу (понад 90 %) антагоністичну активність по відношенню до фітопатогенних грибів *Rhizoctonia solani* та *Nectria inventa*, а види *T. viride*, *T. harzianum* та *Trichoderma* sp. проявляли антагоністичну активність до всього дослідженого кола фітопатогенних гіфальних грибів, проте її величина відрізнялася.

Ключові слова: хронічне опромінення, малі дози, чорнобильська зона відчуження, швидкість радіального росту, антагоністична активність, фітопатогенні гриби, штами роду *Trichoderma*.

1. Вступ

Зона відчуження і дотепер є найбільшим у світі полігоном для вивчення впливу хронічного опромінення на біоту. При дослідженні віддалених наслідків дії хронічного опромінення на мікобіоту зони відчуження ЧАЕС нами вперше було встановлено, що мікроміцети здатні адаптуватися як до великих, так і до низьких доз опромінення за рахунок інтенсифікації великої сукупності біохімічних процесів в організмі, які реалізувалися, зокрема, у прояві таких унікальних властивостей як радіотропізм та радіостимуляція [1–8]. Уперше нами було виявлено, що частота прояву радіостимуляції у мікроміцетів як на рівні організму, так і на молекулярному рівні суттєво збільшується на територіях, що десятиліттями знаходяться під впливом хронічного опромінення і, відповідно, саме такі території можуть бути полігоном для виділення грибів з підвищеною біологічною активністю. Так, було встановлено, що у штамів родів *Cladosporium*, *Hormoconis* та *Aspergillus* спостерігається значне прискорення росту та суттєве підвищення активності антиоксидантних ферментів. У цих грибів активується синтез антистресових пігментів – меланінів і каротиноїдів, а їхня антиоксидантна ємність зростає у кілька разів. Високу деградувальну активність виявлено також у штамів видів

Aspergillus та *Penicillium*: їхня гідролітична активність була істотно вищою, ніж описано в літературі [9]. Таким чином, показано, що здатність до підсилення біологічної активності в умовах хронічного опромінення є характерною для багатьох таксонів мікроскопічних грибів.

З огляду на значну прикладну цінність і потенціал у сфері біологічного контролю хвороб рослин, перспективним напрямом є дослідження біологічної активності штамів роду *Trichoderma* spp., ізольованих зі стаціонарів зони відчуження.

Trichoderma, рід мікроскопічних грибів, який широко використовується в усьому світі для боротьби зі шкідниками рослин, виділяється з різних екологічних середовищ: ґрунту, повітря, поверхні рослин та може ефективно контролювати різноманітні хвороби рослин, викликані як ґрунтовими так і філосферними фітопатогенами [10–14].

Механізми біоконтролю, які реалізує *Trichoderma* і які забезпечують ефективний захист рослин, можуть бути прямими – коли гриб взаємодіє з одним чи кількома патогенами через мікопаразитизм, конкуренцію або антибіоз; та непрямими – коли він активує захисні системи рослин, що дає змогу рослині самостійно протидіяти патогену [15–20].

Встановлено, що *Trichoderma* ефективна проти таких грибкових патогенів, як *Sclerotinia scl-*

rotiorum [20], *Botrytis cinerea* [21], *Rhizoctonia solani*, *Fusarium oxysporum* [22], *Alternaria alternata*, *Aspergillus flavus* [23] та *Fusarium pseudograminearum*. Як біоконтрольний агент, *T. harzianum* ефективно пригнічує патогени рослин, такі як *Fusarium solani* або гриби, що продукують мікотоксини, через конкуренції, антибіоз та індукції захисних реакцій рослин [24].

У нещодавно опублікованому огляді Р. Guzmán-Guzmán та ін. [25] основна увага приділена літературі, щодо з'ясування багатьох механізмів того, як *Trichoderma* взаємодіє з рослинами в ризосфері, ендосфері та філосфері, де вона демонструє різні моделі колонізації та функціональні ознаки, обговорюється синергетична взаємодія між *Trichoderma* та іншими рослинними мікроорганізмами, підкреслюючи їхню важливість у формуванні складних мікробних мереж в агроecosистемах.

На даний момент зростає зацікавленість у пріоритетному використанні виробниками сільськогосподарської продукції екологічно чистих засобів та препаратів у боротьбі з фітопатогена-

ми. Актуальним є пошук антагоністів фітопатогенних грибів, особливо серед грибів, виділених з техногенно забруднених територій, які, як відомо, є джерелом найбільш активних штамів із широким спектром дії з метою потенційного створення на їхній основі біопрепаратів, що будуть використані в сільському господарстві.

Мета роботи – дослідження швидкості росту та антагоністичної активності виділених зі зразків ґрунту зони відчуження штамів роду *Trichoderma* по відношенню до грибів фітопатогенів.

2. Матеріали та методи

Характеристика місць виділення досліджуваних мікроскопічних грибів. Зі зразків ґрунту, відібраних з ряду стаціонарів у зоні відчуження, сформованих у перші роки після Чорнобильської катастрофи, моніторинг яких здійснюється уже понад 35 років (їхня геолокація наведена на рис. 1), були виділені мікроміцети та проведена їхня ідентифікація.

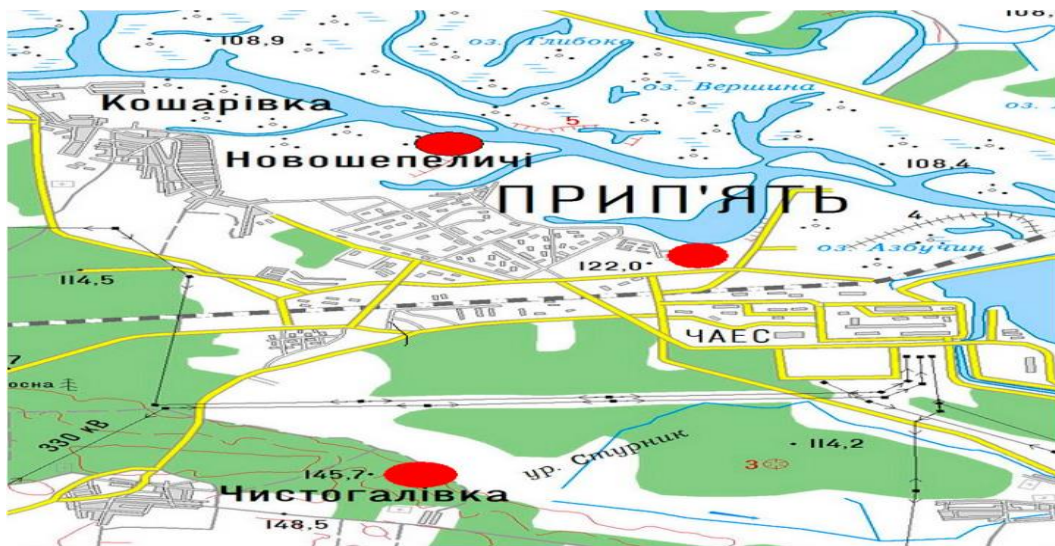


Рис. 1. Стаціонарні точки відбору проб ґрунтів для виділення мікроміцетів.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Підготовка зразків і вимірювання проводилися в лабораторії відділу структури ядра Інституту ядерних досліджень НАН України, що має відповідний дозвіл III класу радіоактивної безпеки.

У місцях відбору зразків ґрунту (див. рис. 1) визначався загальний гамма-фон, сформований сукупністю радіонуклідів, які випадали в процесі горіння четвертого блока ЧАЕС.

У зразках ґрунту, відібраних у позначених місцях, визначались активність і вміст радіонуклідів ^{90}Sr , ^{137}Cs і ^{241}Am . Радіометричний аналіз відібраних зразків ґрунту по гамма-випромінюванню ^{137}Cs і ^{241}Am на гамма-спектрометрі фірми CANBERRA GX-40 з детектором з

надчистого германію, оснащеним вхідним берилієвим вікном завтовшки в 500 мкм, а ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$) визначали за нерадіохімічною методикою [26] на бета-спектрометрі SBS-50 з урахуванням вкладу бета-випромінювання ^{137}Cs і ^{40}K .

Обробка результатів вимірювань гамма-спектрів проводилася за набором програмних кодів WinSpectrum [27], а бета-спектрів за програмою Betafit [26].

Типовий гамма-спектр зразка ґрунту з полігону Новошепеличі подано на рис. 2. У спектрі чітко простежується низькоенергетична область, характерна для випромінювання ^{241}Am (59,3 кеВ), а також рентгенівські лінії, пов'язані з випроміню-

ванням $^{137}\text{Cs}/^{137}\text{Ba}$. Тут видно характеристичні рентгенівські лінії ядра ^{137}Ba , що збуджуються під час β -розпаду ^{137}Cs . У ділянці середніх

енергій добре сформована лінія 661,5 кеВ – енергія розрядки ядра ^{137}Ba після розпаду ^{137}Cs .

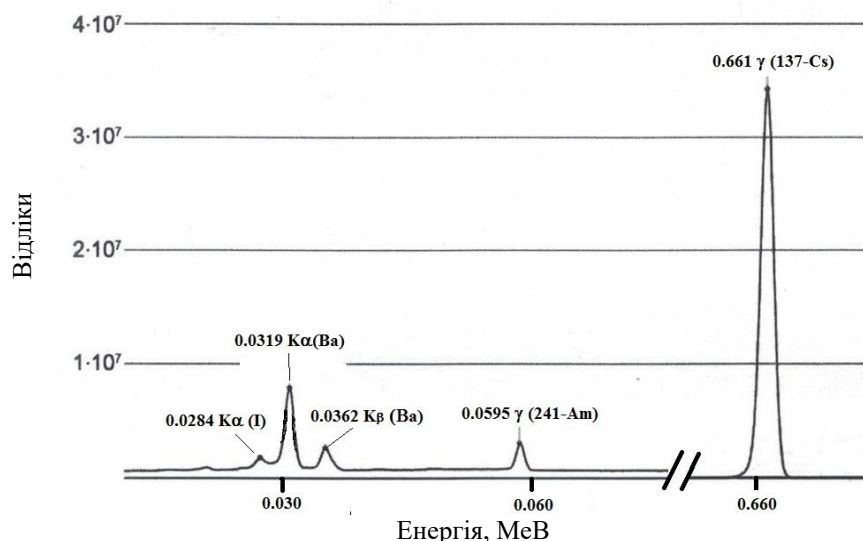
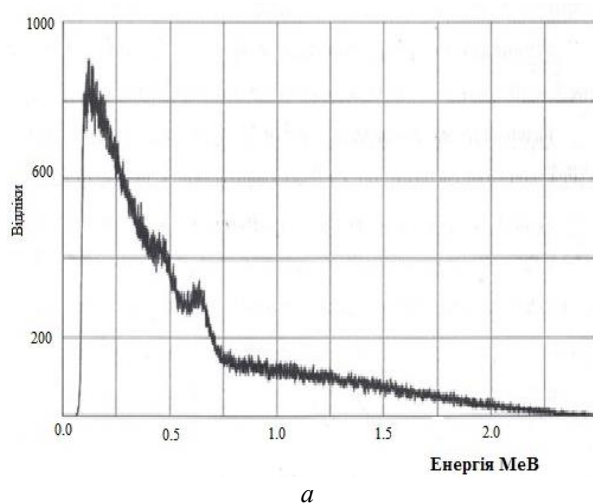


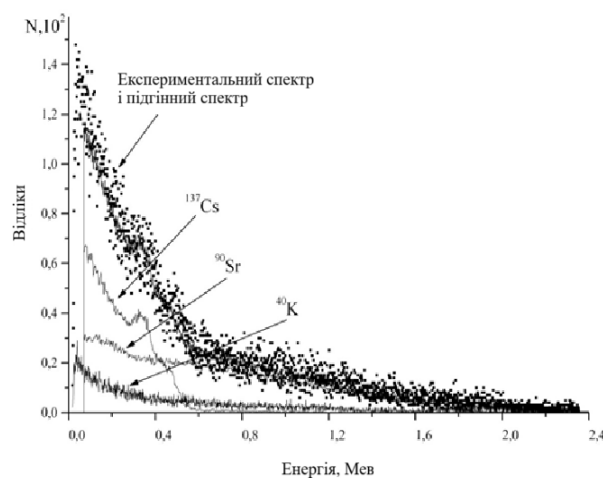
Рис. 2 Фрагмент гамма-спектра ^{241}Am і ^{137}Cs зразка ґрунту з полігону Новошепеличі.

Типовий неперервний бета-спектр для цих же зразків наведено на рис. 3, а. На рис. 3, б подано етапи вписування бета-спектрів фантомних зразків ізотопів ^{137}Cs , ^{40}K і ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$) у загальний розрахунковий бета-спектр «товстої» проби. Виділено характерні ділянки двох граничних

бета-спектрів із межами в низькоенергетичній області – близько 500 кеВ і у високоенергетичній – близько 2300 кеВ, що відповідає граничним енергіям бета-спектра «товстої» проби: приблизно 550 кеВ для ^{90}Sr та 2300 кеВ для ^{90}Y відповідно.



а



б

Рис. 3. Типовий бета-спектр зразка ґрунту (а); аналітична підгонка бета-спектра зразка ґрунту (б).

Бета-спектри фантомних калібрувальних джерел обраховувалися за кубічними сплайнами і в подальшому використовувалися для опису експериментального бета-спектра зразка відповідно до програми Betafit [26].

Виділення мікроміцетів роду *Trichoderma*. Проведено виділення ряду представників мікрокопічних грибів зі зразків ґрунту, зокрема, роду *Trichoderma*, використовуючи метод серійних розведень. Виділення у чисту культуру штамів роду *Trichoderma* проводили, використовуючи ряд твердих поживних середовищ (агаризоване

середовище Чапека - Докса, картопляно-глюкозний агар та агаризоване сусло). Їхню видову ідентифікацію здійснювали за сукупністю морфологічних та культуральних ознак, отриманих під час вирощування на агаризованому середовищі Чапека при мікроскопіюванні з використанням відповідних визначників [28, 29]. Зазначені штами роду *Trichoderma* з моменту виділення до проведення досліджень зберігалися в колекції культур мікрокопічних грибів відділу фізіології і систематики мікроміцетів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного

(ІМВ) НАН України при температурі 6–8 °С на твердому поживному середовищі сусло-агар.

Антагоністична активність по відношенню до грибних фітопатогенів. Антагоністична активність штамів грибів роду *Trichoderma*, ізольованих з ґрунту ряду стаціонарів зони відчуження, досліджена по відношенню до восьми тест-культур фітопатогенних грибів з колекції культур мікроскопічних грибів ІМВ НАН України (<https://ucm.imv.org.ua>): *Nigrospora oryzae* 15996, *Fusarium solani* 50718, *Alternaria alternata* 3043, *Nectria inventa* 3041, *Botrytis cinerea* 16884, *Bipolaris sorokiniana* 16868, *Sclerotinia sclerotiorum* 16883, *Rhizoctonia solani* 16036.

Визначення антагоністичної активності методом дуальної культури. Культури досліджуваних грибів попередньо вирощували на картопляно-декстрозному агарі у чашках Петрі та інкубували за температури 26 ± 2 °С протягом 10–14 діб. Загальноприйнятим методом подвійної культури [30, 31] визначено антагоністичну активність грибів роду *Trichoderma* проти фітопатогенних грибів. Відстань між ділянками інкуляції фітопатогенним штамом і *Trichoderma* становила 3 см. У контрольних чашках Петрі культивували відповідні тест-культури рослинно-патогенних мікроміцетів без антагоністичного штаму роду *Trichoderma*.

Кожен з досліджуваних штамів грибів як представників роду *Trichoderma*, так і відібраних з колекції культур ІМВ НАН України штамів фітопатогенів культивували на агаризованому середовищі Чапека впродовж 10–14 діб за температури 25 ± 2 °С у чашках Петрі. Інкубацію досліджуваних грибів проводили за температури 25 ± 2 °С протягом 2–7 діб.

Антагоністичну активність визначали у відсотках інгібування швидкості росту двох культур за формулою [24, 25]:

$$I(\%) = [(R_1 - R_2) / R_1] \cdot 100,$$

де R_1 – радіус росту штаму фітопатогена у контролі, мм; R_2 – радіус росту штаму фітопатогену з грибом *Trichoderma*, мм.

Усі експерименти проводили в трьох повторях. Розраховано відсоток пригнічення росту збудників хвороб рослин. Створили умовну шкалу величини антагоністичної активності: низька (5–29 %), середня (30–50 %), висока (51–70 %), дуже висока (71–95 %). Зроблено висновок про антагоністичну активність штамів видів роду *Trichoderma* щодо збудників хвороб рослин.

Статистичну обробку результатів проводили з використанням програми Statistica 6.0 та пакета Microsoft Excel. Результати досліджень відповідно до t-критерію Стюдента виявилися статистично достовірними при рівні значимості $p = 0,05$.

3. Результати та обговорення

У попередніх дослідженнях встановлено, що одним з віддалених наслідків дії певного діапазону доз хронічного опромінення на мікобіоту є формування у неї радіоадаптації, яка реалізується в підвищенні біологічної активності багатьох екологічно важливих видів мікроміцетів [3, 4]. Задачею даної роботи було виділення та дослідження біологічної активності потенційно перспективних для біотехнологічних цілей видів роду *Trichoderma* зі зразків ґрунту зони відчуження з різним рівнем радіаційного забруднення. Проведено радіометричний аналіз зразків ґрунту з досліджуваних стаціонарів, з яких були виділені мікроміцети різних видів роду *Trichoderma*. На γ-спектрометрі виявлено суттєву різницю в рівні радіоактивності досліджуваних зразків ґрунту та визначено співвідношення кожного з дозоутворюючих радіонуклідів у них. Отримані дані наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Активність зразків ґрунту зі стаціонарів Чорнобильської зони відчуження

Місце відбору	Штами <i>Trichoderma</i>	Потужність експозиційної дози, мР/год	Забрудненість радіоактивними ізотопами, кБк/м ²			Співвідношення		
			⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	²⁴¹ Am/ ¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am/ ⁹⁰ Sr	⁹⁰ Sr/ ¹³⁷ Cs
Ново-Шепеличі, сосна (5 см)	<i>T. viride</i> 3112	1,1	7,8	39,7	8,6	0,217	1,103	0,196
Ново-Шепеличі, ялина (5 см)	<i>T. viride</i> 3108	1,3	8,3	257,9	17,3	0,068	2,085	0,032
Ново-Шепеличі, ялина (2 см)	<i>T. koningi</i> 3117	1,4	3,4	375,9	7,8	0,021	2,295	0,009
ЛЕП, опора (до 10 см)	<i>Trichoderma</i> sp. 3109	1,8	94,5	806,9	29,1	0,037	0,308	0,117
“Рудий” ліс, між “синичниками” (5 см)	<i>T. atroviride</i> 3111	2,2	427,3	1387,1	54,1	0,04	0,127	0,308
ЛЕП, опора (2 см)	<i>T. harzianum</i> 3113	3,5	2181,9	12834,7	483,5	0,038	0,222	0,17

Таблиця 2. Швидкість радіального росту ізолюваних штамів роду *Trichoderma* та типи ґрунтів у місцях відбору проб

Штами <i>Trichoderma</i>	Швидкість радіального росту K_r , мм/год	Типи ґрунтів*
<i>T. viride</i> 3112	$0,56 \pm 0,028$	A1
<i>T. viride</i> 3108	$0,63 \pm 0,032$	A1
<i>T. koningi</i> 3117	$0,61 \pm 0,031$	A2
<i>T. sp.</i> 3109	$0,59 \pm 0,030$	A2
<i>T. atroviride</i> 3111	$0,57 \pm 0,029$	A2
<i>T. harzianum</i> 3113	$0,59 \pm 0,030$	A2

Примітка. * Типи ґрунтів у місцях відбору проб: A1 – болотний мінерально-суглинково-піщаний ґрунт; A2 – дерново-слабопідзолистий суглинково-піщаний ґрунт.

Із шести зразків ґрунту, радіометричний аналіз яких представлено в табл. 1, було виділено та ідентифіковано шість штамів роду *Trichoderma*, які були представлені п'ятьма видами: *T. viride* 3112, *T. viride* 3108, *T. koningi* 3117, *Trichoderma* sp. 3109, *T. atroviride* 3111 та *T. harzianum* 3113.

У виділених видів проведено визначення швидкості радіального росту як інтегрального показника біологічної активності (табл. 2).

Показано, що швидкість росту досліджуваних штамів роду *Trichoderma* наближається до верхньої межі літературного діапазону радіального росту, характерного для різних видів цього роду, які застосовуються у біотехнологічних препаратах. У доступних джерелах цей діапазон становить 0,4–0,7 мм/год [28, 29].

Штами *Trichoderma* spp. швидко колонізують субстрат, позбавляючи гриб-фітопатоген життєвого простору. Саме здатність до швидкого росту, що притаманна видам роду *Trichoderma* порівняно з іншими видами мікроміцетів, особливо тими, що мають фітопатогенні властивості,

є одним з механізмів антагоністичної дії цих мікроміцетів.

У подальших експериментах була визначена їхня антагоністична активність по відношенню до восьми широко розповсюджених фітопатогенних грибів: *Nectria inventa*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Rhizoctonia solani*, *Nigrospora oryzae*, *Fusarium solani*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*, *Bipolaris sorokiniana*.

У результаті проведеного дослідження було виявлено такі реакції-відповіді штамів різних видів роду *Trichoderma*, виділених зі стаціонарів з різною радіоактивністю (рис. 4–6).

Встановлено, що для виду *T. harzianum* 3113 притаманна середня та висока антагоністична активність по відношенню до всіх восьми видів фітопатогенів, що робить цей штам перспективним за дії широкого спектра патогенів (див. рис. 4, а). Висока активність виявлена до чотирьох видів: *N. oryzae*, *N. inventa*, *S. sclerotiorum* та *R. solani*.

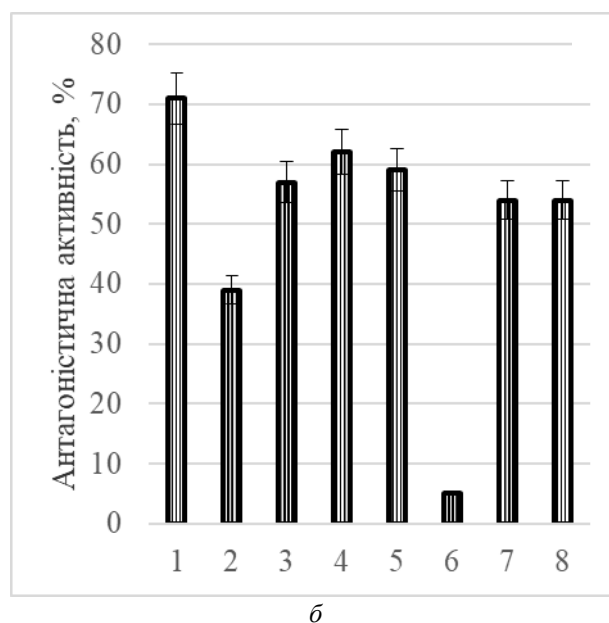
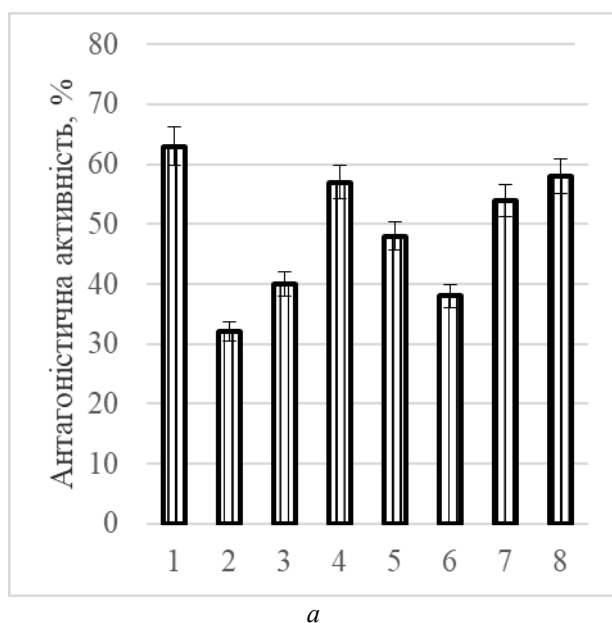


Рис. 4. Антагоністична активність *Trichoderma harzianum* 3113 (а) та *Trichoderma* sp. 3109 (б) по відношенню до тест-культур фітопатогенних мікроорганізмів: 1 - *Nigrospora oryzae* 15996, 2 - *Fusarium solani* 50718, 3 - *Alternaria alternata* 3043, 4 - *Nectria inventa* 3041, 5 - *Botrytis cinerea* 16884, 6 - *Bipolaris sorokiniana* 16868, 7 - *Sclerotinia sclerotiorum* 16883, 8 - *Rhizoctonia solani* 16036.

Для штаму *Trichoderma* sp. 3109 виявлено різний рівень антагоністичної активності від низької по відношенню до *B. sorokiniana*, середньої до *F. solani* та високої до всіх інших досліджуваних фітопатогенів (див. рис. 4, б). Такий спектр дії може бути перспективним при переважанні патогенів видів *N. oryzae*, *A. alternata*, *N. inventa* та *B. cinerea*.

Встановлено, що штами виду *T. viride* проявляли різну активність по відношенню до досліджуваних фітопатогенів. Так, штам *T. viride* 3112

мав дуже високу антагоністичну активність до двох досліджуваних фітопатогенів – *Nigrospora oryzae* та *Nectria inventa*, високу – до *Botrytis cinerea* та *Sclerotinia sclerotiorum*, середню – до *Rhizoctonia solani*, а до інших (12,5 %) – низьку (див. рис. 5, а).

Штам *T. viride* 3108 проявляв дуже високу активність щодо *S. sclerotiorum* та *N. inventa*, високу – щодо *B. cinerea*, *Nigrospora oryzae* та *Rhizoctonia solani*, а щодо інших досліджуваних фітопатогенів (37,5 %) – низьку (див. рис. 5, б).

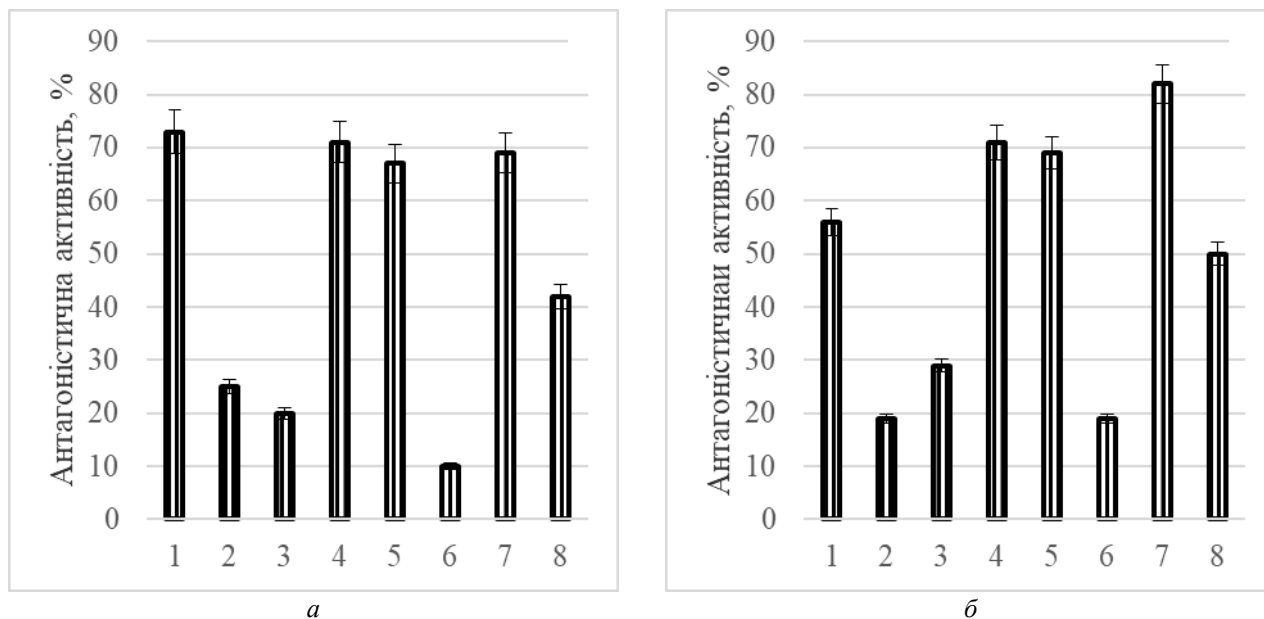


Рис. 5. Антагоністична активність *Trichoderma viride* 3112 (а) та *Trichoderma viride* 3108 (б), по відношенню до тест-культур фітопатогенних мікроорганізмів: 1 - *Nigrospora oryzae* 15996, 2 - *Fusarium solani* 50718, 3 - *Alternaria alternata* 3043, 4 - *Nectria inventa* 3041, 5 - *Botrytis cinerea* 16884, 6 - *Bipolaris sorokiniana* 16868, 7 - *Sclerotinia sclerotiorum* 16883, 8 - *Rhizoctonia solani* 16036.

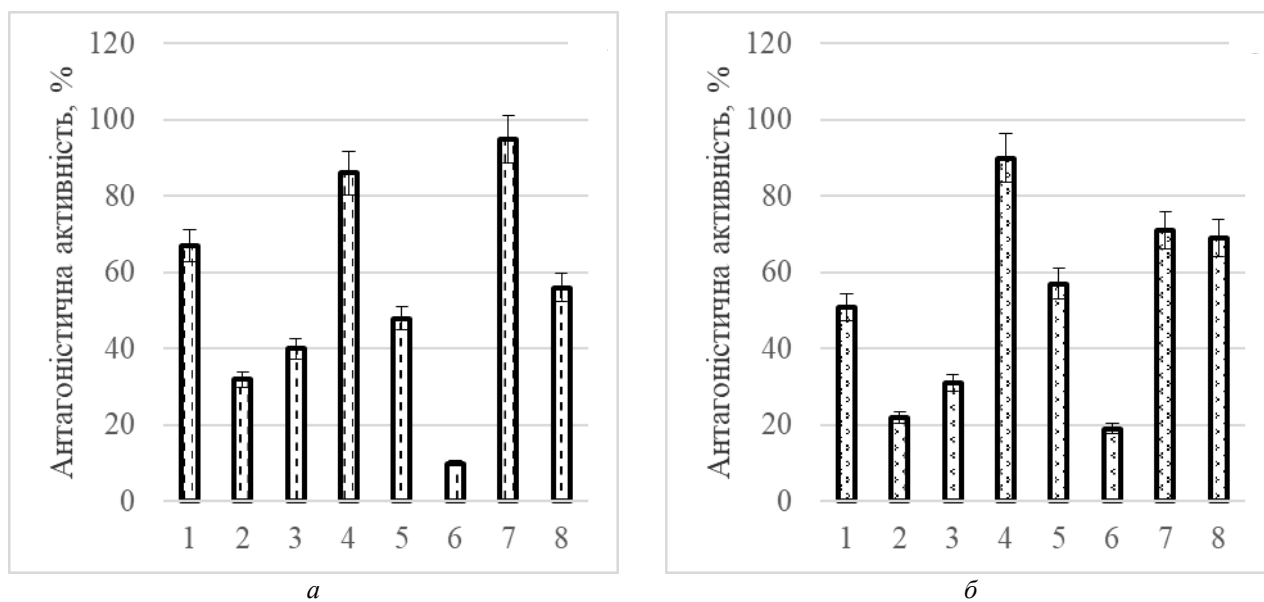


Рис. 6. Антагоністична активність *Trichoderma koningi* 3117 (а) та *Trichoderma atroviride* 3111 (б) по відношенню до тест-культур фітопатогенних мікроорганізмів: 1 - *Nigrospora oryzae* 15996, 2 - *Fusarium solani* 50718, 3 - *Alternaria alternata* 3043, 4 - *Nectria inventa* 3041, 5 - *Botrytis cinerea* 16884, 6 - *Bipolaris sorokiniana* 16868, 7 - *Sclerotinia sclerotiorum* 16883, 8 - *Rhizoctonia solani* 16036.

У штаму виду *T. koningi* 3117, на відміну від інших видів, виявлена дуже висока антагоністична активність по відношенню до фітопатогенів *S. sclerotiorum* та *N. inventa* – 95 % та 90 % відповідно (див. рис. 6, а).

Штам *Trichoderma atroviride* 3111 характеризувався дуже високою антагоністичною активністю до *N. inventa* (90 %) та *S. sclerotiorum* (72 %), високою – до *R. solani*, *N. oryzae*, та *B. cinerea* (див. рис. 6, б).

У досліджених штамів п'яти видів роду *Trichoderma*, які тривалий час знаходилися під впливом хронічного опромінення і були виділені з різних за рівнем радіоактивного забруднення стаціонарів зони відчуження (дані наведено в табл. 1 і 2) було виявлено вищу за середньо відому в літературі швидкість радіального росту, яка становила від 0,56 до 0,63 мм/год, тобто спо-

стерігалася тенденція до підвищення їхньої біологічної активності [28, 29]. Узагальнюючи отримані дані, слід зазначити, що в усіх досліджених штамів *Trichoderma* виявлено значну антагоністичну активність по відношенню до досліджених мікофітопатогенів (табл. 3). Не виявлено суттєвої залежності антагоністичної активності досліджуваних штамів по відношенню до певних фітопатогенів від рівня потужності експозиційної дози та забрудненості радіоактивними ізотопами сайтів виділення, що, на нашу думку, може бути пов'язане з тим, що зміни у межах одного порядку потужності експозиційної дози не є суттєвими для досліджуваних видів *Trichoderma*. Отримані дані добре узгоджуються з даними літератури про прояв гормезису у представників біоти за тривалої дії хронічного опромінення низької інтенсивності [2–8].

Таблиця 3. Антагоністична активність штамів *Trichoderma* spp. до фітопатогенних гіфальних грибів

Штами роду <i>Trichoderma</i>	Тест-культури фітопатогенних мікроорганізмів							
	<i>N. oryzae</i> 15996	<i>F. solani</i> 50718	<i>A. alternate</i> 3043	<i>N. inventa</i> 3041	<i>B. cinerea</i> 16884	<i>B. sorokiniana</i> 16868	<i>S. sclerotiorum</i> 16883	<i>R. solani</i> 16036
<i>T. viride</i> 3112	*****	*	*	*****	***	*	***	**
<i>T. viride</i> 3108	***	*	*	*****	***	*	*****	**
<i>T. koningi</i> 3117	***	*	**	*****	**	*	*****	***
<i>T. sp.</i> 3109	*****	**	***	***	***	*	***	***
<i>T. harzianum</i> 3113	***	**	**	***	**	**	***	***
<i>T. atroviride</i> 3111	***	*	**	*****	***	*	*****	***

Примітки. Умовна шкала величини антагоністичної активності: * – низька (5–29 %); ** – середня (30–50 %); *** – висока (51–70 %); ***** – дуже висока (71–95 %).

Ступінь прояву антагоністичної дії на окремі види фітопатогенів визначався самим видом фітопатогену та особливостями дії певного виду *Trichoderma*, тобто вплив мав більше видоспецифічний характер.

Узагальнюючи результати проведеного дослідження видів роду *Trichoderma* встановлено, що особливості реалізації їхньої антагоністичної активності по відношенню до тест-культур фітопатогенних грибів мали видоспецифічний характер.

Дуже високий антифунгальний потенціал штамів видів *T. koningi* 3117 та *T. atroviride* 3111 переважно спрямований на певні види фітопатогенів. Так, у *T. koningi* 3117, на відміну від інших видів, виявлена дуже висока антагоністична активність по відношенню до двох видів фітопатогенів – *S. sclerotiorum* та *N. Inventa*: 95 % та 90 % відповідно. У *T. atroviride* 3111 виявлена

дуже висока антагоністична активність до *N. inventa* (90 %) та *S. sclerotiorum* (72 %).

Згідно з даними літератури, основним механізмом, який використовують *T. koningi* та *T. atroviride* як засіб біоконтролю проти грибкових патогенів, є мікопаразитизм та антогонізм [32]. Тим не менш, ці види також використовують інші стратегії для обмеження росту різних рослинних патогенів, зокрема, стратегії синергетичної взаємодії з іншими мікроорганізмами та підсилення захисної сили рослини [24, 25].

Встановлено, що у *T. harzianum* 3113 висока антагоністична активність виявлена до 50 % досліджених грибів фітопатогенів: *N. oryzae*, *N. inventa*, *S. sclerotiorum* та *R. solani*. Високий антифунгальний потенціал *Trichoderma* sp. 3109 теж проявлявся до 50 % досліджуваних штамів фітопатогенів, проте їхній спектр відрізнявся: *N. oryzae*, *A. alternata*, *N. inventa* та *B. cinerea*.

Досліджені штами виду *T. viride* мали більш широкий спектр антифунгальної дії, проявляючи високу і дуже високу антагоністичну активність по відношенню до 75 % досліджених фітопатогенів – *N. oryzae*, *N. inventa*, *S. sclerotiorum*, *B. cinerea* та *R. solani*. Отримані результати доповнюють літературні дані щодо кола грибних фітопатогенів, зокрема *Botrytis*, *Fusarium* і *Rhizoctonia*, по відношенню до яких види *T. koningi* та *T. viride* проявляють пригнічуючий вплив, хоча ступінь вираженості інгібуючої дії щодо різних видів суттєво відрізняється [33–36]. *T. viride* вивчався як стимулятор росту рослин та підсилювач бажаних ознак у них [37], а також як важливий організм у процесах біоремедіації – зокрема під час підготовки поверхонь для видалення токсичних органічних сполук, таких як толуол [38] і тротил [39], або важких металів, зокрема свинцю [40]. Це робить рід *Trichoderma* перспективним для подальшого вивчення в різних можливих застосуваннях, не обмежувачись сільськогосподарським використанням.

4. Висновки

У досліджуваних штамів гіфальних грибів, що були виділені з ґрунтів зони відчуження, які зазнають дії постійного хронічного опромінення було виявлено підвищену біологічну активність. Спостерігалось підвищення величини такого інтегрального показника, як швидкість радіального росту. Встановлено, що штами п'яти досліджуваних видів роду *Trichoderma* мали здатність до активного пригнічення росту фітопатогенів, що є дуже перспективним у створенні на їхній основі біологічних препаратів. Визначено ступінь прояву антагоністичної активності різних видів *Trichoderma* по відношенню як до окремих фітопатогенів, так і для широкого кола видів патогенних грибів. Отримані результати є перспективними у створенні на їхній основі біопрепаратів контролю за фітосанітарним станом рослин. Залежно від потреб, препарати можуть створюватися як комплекс із кількох штамів, що розширює їхній спектр біологічної дії, сприяючи захисту рослин і підвищенню врожайності сільськогосподарських культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. N.N. Zhdanova et al. Ionizing radiation attracts soil fungi. *Mycol. Res.* 108(9) (2004) 1089.
2. T. Tugay et al. The influence of ionizing radiation on spore germination and emergent hyphal growth response reactions of microfungi. *Mycologia* 98(4) (2006) 521.
3. Т.І. Тугай. Вплив низьких доз іонізуючого випромінювання на накопичення меланінових пігментів та активність каталази і супероксиддисмутази у *Cladosporium cladosporioides*. Укр. біохім. журн. 79(6) (2007) 93. / T.I. Tugay. Effect of low doses of ionizing radiation on the accumulation of melanin pigments and the activity of catalase and superoxide dismutase in *Cladosporium cladosporioides*. Ukr. Biochem. J. 79(6) (2007) 93. (Ukr)
4. J. Dighton, T. Tugay, N. Zhdanova. Fungi and ionizing radiation from radionuclides. *FEMS Microbiol. Lett.* 281(2) (2008) 109.
5. T. Tugay et al. Effects of ionizing radiation on the antioxidant system of microscopic fungi with radioadaptive properties found in the Chernobyl Exclusion Zone. *Health Phys.* 101(4) (2011) 375.
6. Т.І. Тугай. Вплив іонізуючого опромінення на активність ферментів антиоксидантного захисту *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson. *Мікробіол. журн.* 73(1) (2011) 29. / T.I. Tugay. Influence of ionizing radiation on activity of enzymes of antioxidant protection of *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson. *Microbiol. Z.* 73(1) (2011) 29. (Ukr)
7. Т.І. Тугай, А.В. Тугай. Adaptation of microfungi to chronic ionizing radiation. New facts and hypotheses. *Mikrobiol. Z.* 79(1) (2017) 76.
8. А.В. Тугай та ін. Швидкість радіального росту та активність ферментів антиоксидантного захисту у трьох пострадіаційних генерацій *Cladosporium cladosporioides*. *Ядерна фізика та енергетика* 18(1) (2017) 72. / A.V. Tugay et al. Radial growth and activity of antioxidant enzymes in the three post-radiation *Cladosporium cladosporioides* generations. *Nucl. Phys. At. Energy* 18(1) (2017) 72. (Ukr)
9. Н.В. Борзова та ін. Глікозидазна та протеолітична активність мікроміцетів, виділених з чорнобильської зони відчуження. *Мікробіол. журн.* 82(2) (2020) 51. / N.V. Borzova et al. Glycosidase and proteolytic activity of micromycetes isolated from the Chernobyl Exclusion Zone. *Mikrobiol. Z.* 82(2) (2020) 51. (Ukr)
10. S. Haouach et al. Three new reports of *Trichoderma* in Algeria: *T. atrobrunneum*, (South) *T. longibrachiatum* (South), and *T. afroharzianum* (North-west). *Microorganisms* 8(10) (2020) 1455.
11. H. Zheng et al. New species of *Trichoderma* isolated as endophytes and saprobes from Southwest China. *J. Fungi* 7(6) (2021) 467.
12. R. Wang et al. The newly identified *Trichoderma harzianum* partitivirus (ThPV2) does not diminish spore production and biocontrol activity of its host. *Viruses* 14(7) (2022) 1532.
13. I. Vicente et al. Combined comparative genomics and gene expression analyses provide insights into the terpene synthases inventory in *Trichoderma*. *Microorganisms* 8(10) (2020) 1603.
14. A. Abbas et al. *Trichoderma* spp. genes involved in the biocontrol activity against *Rhizoctonia solani*. *Front. Microbiol.* 13 (2022) 884469.
15. B. Tilocca, A. Cao, Q. Migheli. Scent of a killer: microbial volatilome and its role in the biological control of plant pathogens. *Front. Microbiol.* 11 (2020) 41.

16. D.C. Fontana et al. Endophytic fungi: biological control and induced resistance to phytopathogens and abiotic stresses. *Pathogens* 10(5) (2021) 570.
17. B. Sánchez-Montesinos et al. Biological control of fungal diseases by *Trichoderma aggressivum* f. *europaeum* and its compatibility with fungicides. *J. Fungi* 7(8) (2021) 598.
18. A.A. Al-Surhanee. Protective role of antifusarial eco-friendly agents (*Trichoderma* and salicylic acid) to improve resistance performance of tomato plants. *Saudi J. Biol. Sci.* 29(4) (2022) 2933.
19. R. Tyśkiewicz et al. *Trichoderma*: the current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *Int. J. Mol. Sci.* 23(4) (2022) 2329.
20. P.K. Mukherjee et al. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. *Fungal Biol. Rev.* 39 (2022) 15.
21. A. Alfiky, L. Weisskopf. Deciphering *Trichoderma*-plant-pathogen interactions for better development of biocontrol applications. *J. Fungi* 7(1) (2021) 61.
22. M.A. Abro et al. Biocontrol potential of fungal endophytes against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* causing wilt in cucumber. *Plant Pathol. J.* 35(6) (2019) 598.
23. P.L. Kashyap et al. Biocontrol potential of salt-tolerant *Trichoderma* and *Hypocrea* isolates for the management of tomato root rot under saline environment. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20 (2020) 160.
24. J.G. Erazo et al. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma harzianum* ITEM 3636 against peanut brown root rot caused by *Fusarium solani* RC 386. *Biol. Control* 164 (2021) 104774.
25. P. Guzmán-Guzmán, H. Etesami, G. Santoyo. *Trichoderma*: a multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC Microbiol.* 25 (2025) 434.
26. V.A. Zheltonozhsky et al. Spectroscopy of radiostrontium in fuel materials retrieved from the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Health Physics* 120(4) (2021) 378.
27. N.V. Strilchuk. The WinSpectrum. Manual (Kyiv, 2000).
28. M.A. Rifai. *A Revision of the Genus Trichoderma*. Mycological papers. Vol. 116 (England, Kew, Surrey, Commonwealth Mycological Institute, 1969) 56 p.
29. K.H. Domsch, W. Gams, T.-H. Anderson. *Compendium of Soil Fungi*. 2nd ed. (Eching, IHW-Verlag, 2007) 672 p.
30. Ya.I. Savchuk et al. *Trichoderma* strains – antagonists of plant pathogenic micromycetes. *Microbiol. Z.* 84(1) (2022) 24.
31. I.M. Kurchenko et al. Antibacterial activity of different strains of the genus *Trichoderma*. *Microbiol. Z.* 84(4) (2022) 59.
32. S. Singh et al. Harnessing *Trichoderma* mycoparasitism as a tool in the management of soil dwelling plant pathogens. *Microbial Ecology* 87 (2024) 158.
33. Y. Tian et al. Antagonistic and detoxification potentials of *Trichoderma* isolates for control of zearalenone (ZEN) producing *Fusarium graminearum*. *Front. Microbiol.* 8 (2018) 325406.
34. K. Saravanakumar et al. Effect of *Trichoderma harzianum* on maize rhizosphere microbiome and biocontrol of *Fusarium* Stalk rot. *Sci. Rep.* 7 (2017) 1771.
35. V.I. Herrera-Téllez et al. The protective effect of *Trichoderma asperellum* on tomato plants against *Fusarium oxysporum* and *Botrytis cinerea* diseases involves inhibition of reactive oxygen species production. *Int. J. Mol. Sci.* 20(8) (2019) 2007.
36. X. Yao et al. *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Front. Microbiol.* 14 (2023) 1160551.
37. R.A. Metwally. Arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma viride* cooperative effect on biochemical, mineral content, and protein pattern of onion plants. *J. Basic Microbiol.* 60(8) (2020) 712.
38. X. Wang et al. Preparation of porous carbon based on partially degraded raw biomass by *Trichoderma viride* to optimize its toluene adsorption performance. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2021) 46186.
39. Z.A. Alothman et al. Bioremediation of explosive TNT by *Trichoderma viride*. *Molecules* 25(6) (2020) 1393.
40. D. Luo et al. *Trichoderma viride* involvement in the sorption of Pb(II) on muscovite, biotite and phlogopite: Batch and spectroscopic studies. *J. Hazard. Mater.* 401 (2021) 123249.

T. I. Tugay^{1,2,*}, A. V. Tugay^{1,2}, V. O. Zheltonozhsky³, O. M. Yurieva²,
L. T. Nakonechna², L. V. Sadovnikov³, N. M. Sergiichuk¹, O. B. Polishchuk⁴

¹ The Open International University of Human Development “Ukraine”, Kyiv, Ukraine

² Zabolotny Institute of Microbiology and Virusology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: tatyanatugay2@gmail.com

STUDY OF THE ANTAGONISTIC ACTIVITY OF *TRICHODERMA* SPP. STRAINS ISOLATED FROM SITES WITH DIFFERENT LEVELS OF RADIATION CONTAMINATION IN THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE AGAINST PHYTOPATHOGENIC HYPHAL FUNGI

A radiometric analysis of soil samples from the studied areas of the exclusion zone, which have been under exposure to chronic irradiation for more than three decades, was carried out, from which micromycetes of different species of the genus *Trichoderma* were isolated, and their biological activity was studied. It was shown that the radial

growth rate of these fungi exceeds the average values for species of this genus. It was found that the isolated strains of the species *T. koningi* and *T. atroviride* have very high (over 90 %) antagonistic activity towards the phytopathogenic fungi *Rhizoctonia solani* and *Nectria inventa*, and the species *T. viride*, *T. harzianum*, and *Trichoderma* sp. showed antagonistic activity towards the studied species of phytopathogenic hyphal fungi researched, but their magnitude was different.

Keywords: chronic irradiation, low doses, Chornobyl Exclusion Zone, radial growth rate, antagonistic activity, phytopathogenic fungi, strains of the genus *Trichoderma*.

Надійшла / Received 24.07.2025