

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.3.6>

Received: 22.04.2026
Revised: 21.05.2026
Accepted: 29.05.2026
Published: 29.05.2026

Владислава ПОТУПА¹, Крістіна ГУСЕЙНОВА¹,
Леся МАЙСТРЕНКО¹, Людмила ШКОТОВА²,
Ірина ВОЛОШИНА¹

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

²Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, Київ, Україна

УДК 602.6:546.57-
022.532]:[632.93:
582.28]:504.05

БІОГЕННІ НАНОЧАСТКИ СРІБЛА ЯК ІНСТРУМЕНТ АНТИФУНГАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА БІОБЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ

Мета. Визначити антифунгальну активність біогенних наночастинок срібла, синтезованих за допомогою супернатанту культуральної рідини *Lactobacillus acidophilus* УКМ В-2691, щодо тест-культур *Fusarium solani*, *Alternaria alternata*, *Rhizoctonia solani*, *Nigrospora oryzae*, а також мікроміцетів, виділених із пошкодженого листя троянди сорту «Black Magic».

Методика. Біогенний синтез AgNPs здійснювали з використанням супернатанту культуральної рідини *Lactobacillus acidophilus* УКМ В-2691. Середній розмір синтезованих наночастинок визначали методом фотонної кореляційної спектроскопії (34,66 нм). Антифунгальну активність досліджували методом «отруєної їжі» на середовищі Сабуро-агар. Наночастки срібла вносили в поживне середовище у концентраціях 0,1; 1; 10 та 100 мМ. Тест-культури інкубували при температурі 25±1 °С протягом 7 діб. Оцінку проводили візуально за розміром і морфологією колоній, порівнюючи з контролем (без AgNPs). Використовували колекційні штами з Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України та ізоляти, виділені з листя троянди.

Результати. Біогенні AgNPs продемонстрували виражену дозозалежну антифунгальну активність. Найвищу чутливість продемонструвала *Alternaria alternata*: вже за концентрації 1 мМ відмічалось істотне пригнічення росту, тоді як при 10 мМ розвиток міцелію практично повністю припинявся. При концентрації 0,1 мМ відзначали лише початкові ознаки стресу. *Picm Rhizoctonia solani* та *Nigrospora oryzae* теж децю пригнічувався при концентрації 1 мМ. *Fusarium solani* проявляв нижчу чутливість, а саме, виражений ефект відзначено при 1–10 мМ, однак максимальне пригнічення – при 10–100 мМ. Серед ізолятів із листя троянди «Black Magic» один демонстрував високу чутливість до 10 мМ AgNPs, тоді як інші виявляли значну стійкість.

Наукова новизна. Вперше досліджено антифунгальну активність біогенних наночастинок срібла, синтезованих із використанням супернатанту *Lactobacillus acidophilus* УКМ В-2691, щодо комплексу фітопатогенних мікроміцетів, включаючи ізоляти з ураженого листя троянди. Встановлено видові відмінності чутливості досліджених патогенів та показано дозозалежний характер інгібуючої дії наночастинок.

Практична значимість. Отримані результати свідчать про доцільність використання біогенних наночастинок срібла як перспективного засобу захисту рослин від фітопатогенних мікроміцетів. Їх застосування може сприяти зменшенню використання традиційних хімічних фунгіцидів, зниженню екологічного навантаження та мінімізації накопичення токсичних залишків у рослинній продукції. Встановлені закономірності дії AgNPs можуть бути використані як основа для подальшої розробки ефективних біофунгіцидних препаратів.

Ключові слова: біогенний синтез; наносрібло; *Lactobacillus acidophilus*; мікроміцети; фітопатогени; антифунгальна активність.

Вступ. Сільське господарство відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки людства. Водночас фітопатогенні мікроміцети щороку спричиняють значні втрати врожаю сільськогосподарських культур, викликаючи кореневі та стеблові гнилі, плямистості листя, а також погіршуючи якість продукції. Не менш серйозно страждають і декоративні рослини, зокрема троянди. Грибкові захворювання у них призводять до втрати декоративності, передчасного опадання листя, ослаблення рослин і, як наслідок, значного зниження їхньої ринкової цінності. Традиційним засобом боротьби з фітопатогенними грибами залишається застосування хімічних фунгіцидів. Однак їх тривале та масове використання призводить до

розвитку резистентності у патогенів, накопичення токсичних залишків у ґрунті, воді та рослинній продукції, а також негативного впливу на навколишнє середовище і здоров'я людини. У зв'язку з цим зростає глобальна потреба у пошуку екологічно безпечних і ефективних альтернативних методів захисту рослин [1]. Останніми роками значну увагу дослідників привертають наноматеріали, зокрема біогенні наночастки срібла (AgNPs). Завдяки високій площі поверхні, здатності вивільняти іони Ag^+ та генерувати активні форми кисню, AgNPs ефективно порушують цілісність клітинної стінки і мембрани грибів, інгібують синтез ергостеролу, порушують метаболізм і спричиняють загибель клітин мікроміцетів [2, 3]. Біогенний синтез AgNPs за допомогою мікроорганізмів, зокрема молочнокислих бактерій, має вагомі переваги порівняно з фізичними та хімічними методами. Він є екологічно чистим, економічно доступним, відбувається в м'яких умовах і не потребує використання токсичних реагентів. Молочнокислі бактерії завдяки продукції метаболітів (наприклад, органічних кислот, ферментів, полісахаридів тощо) здатні ефективно відновлювати іони срібла до наночасток із їх подальшою біологічною стабілізацією. Аналіз сучасних літературних даних свідчить про високу антифунгальну активність біогенних AgNPs проти широкого спектра фітопатогенних мікроміцетів. Водночас більшість досліджень стосується наночасток, синтезованих рослинними екстрактами або іншими бактеріальними культурами. Дані щодо антифунгальної дії біогенних наночасток срібла, отриманих саме за допомогою молочнокислих бактерій, залишаються обмеженими і потребують детального вивчення [4, 5].

Постановка завдання. Попри наявність численних досліджень, присвячених антифунгальним властивостям наночасток срібла, питання ефективності біогенних AgNPs, отриманих за участю мікроорганізмів, залишається недостатньо вивченим. Особливий інтерес становлять наночастки, синтезовані за допомогою молочнокислих бактерій, однак дані щодо їх дії на фітопатогенні мікроміцети та залежності ефекту від концентрації є обмеженими. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі. Мета роботи полягає у визначенні антифунгальної активності біогенних наночасток срібла, синтезованих із використанням супернатанту культуральної рідини *Lactobacillus acidophilus* УКМ В-2691, щодо тест-культур *Fusarium solani*, *Alternaria alternata*, *Rhizoctonia solani*, *Nigrospora oryzae*, а також мікроміцетів, виділених із пошкодженого листя троянди сорту «Black Magic», і встановленні ефективних концентрацій цих наночасток для пригнічення росту зазначених патогенів.

Результати дослідження. Визначення біологічної активності є критично важливим етапом дослідження, оскільки саме функціональні властивості визначають доцільність їх подальшого практичного застосування у сільському господарстві. У зв'язку з цим біогенно синтезовані наночастки срібла було досліджено на наявність антифунгальної активності.

Для проведення дослідження використовували синтезовані нами наночастки срібла за допомогою біогенного методу. Наночастки отримували використовуючи культуру молочнокислих бактерій *Lactobacillus acidophilus* УКМ В-2691, які були надані Інститутом мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України. Для визначення розміру наночасток застосовували метод фотонної кореляційної спектроскопії з використанням аналізатора розміру наночасток BeNano 90 (КНР). За результатами вимірювань встановлено, що середній розмір синтезованих наночасток становить 34,66 нм.

У ході роботи використовувались такі тест культури, як *Fusarium solani* (рис. 1, а), *Alternaria alternata* (рис. 1, б), *Rhizoctonia solani* (рис. 1, в) та *Nigrospora oryzae* (рис. 1, г). Дані мікроорганізми були отримані з колекції відділу фізіології і систематики мікроміцетів Інституту мікробіології і вірусології імені Д.К. Заболотного НАН України.

Видовий комплекс *F. solani* – це група нитчастих грибів, до яких належить близько 60 філогенетичних видів, які важко відрізняються за морфологією. *F. solani* належать до родини *Nectriaceae*. Колонії на середовищі Сабуро-агар виростають досить швидко, досягаючи 4,5–8 см за період від 4 до 10 днів. На початкових етапах вони мають біле або кремове забарвлення з

наявністю повітряного міцелію. Згодом колір може змінюватися, набуваючи блакитно-коричневих або синьо-зелених відтінків через утворення спородохій. *F. solani* є одним із найпоширеніших грибів, що паразитують у ґрунтах по всьому світу.

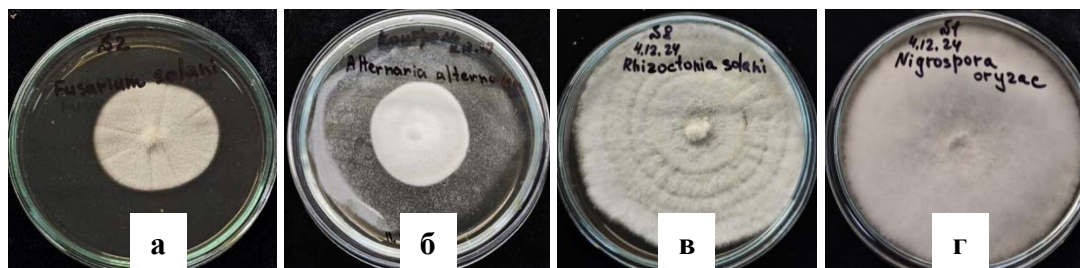


Рис. 1. Тест культури висіяні на чашках Петрі на середовищі Сабуро-агар: а – *Fusarium solani*; б – *Alternaria alternata*; в – *Rhizoctonia solani*; г – *Nigrospora oryzae*

Цей мікроорганізм виконує різні екологічні ролі, зокрема функціонує як сапротроф, розкладаючи рослинні рештки, а також виступає ендодітом або патогеном. Даний комплекс вирізняється широким спектром хазяїв, що налічує понад 66 родин рослин. До рослин, які піддаються ураженню *F. solani*, належать овочеві культури (картопля, огірки, бобові, гарбузові), плодів дерева, декоративні рослини та лісові види. Гриб здатний виживати в ґрунті завдяки формуванню хламідоспор. Його поширення переважно відбувається через воду, механічне пошкодження кореневої системи, інфіковане насіння або контаміновані інструменти. Оптимальні умови для росту цього патогенна включають вологий, багатий на органічні залишки ґрунт та підвищені температури. Серед прикладів патологій можна виділити суху гниль картоплі, гниль кореневої системи бобових, огірків і цитрусових. Крім цього, грибок викликає в'янення, некрози та загибель рослин. Основними симптомами ураження є некротичні ураження коренів та стебла, пожовтіння листя, загальне в'янення й подальша загибель рослини [6, 7].

A. alternata, *R. solani* та *N. oryzae* є поширеними фітопатогенними грибами, що уражають широкий спектр сільськогосподарських культур і характеризуються швидким ростом колоній на поживних середовищах та здатністю тривалий час зберігатися в навколишньому середовищі. *A. alternata* належить до класу гіфоміцетів і продукує ферменти та токсини, зокрема тентоксин, спричиняючи плямистості, гнилі плодів і водночас виступаючи одним із найпоширеніших аероалергенів, пов'язаних із розвитком алергічного риніту та бронхіальної астми [8, 9]. *R. solani*, представник Basidiomycota, уражує понад 250 видів рослин, пошкоджуючи корені, стебла, листя та плоди, а також здатний виживати у ґрунті у формі склероціїв протягом кількох років [10]. *N. oryzae* інфікує кукурудзу, рис, пшеницю, сорго та інші культури, викликаючи некротичні плями, хлороз і передчасне опадання листя, що негативно впливає на фотосинтез і врожайність; його колонії з віком темнішають унаслідок активного спороутворення [11, 12].

Іншими тест-культурами були мікроміцети, виділені з пошкодженого листя троянди червоної «Black Magic».

Для оцінки впливу наносрібла було обрано метод «отруєної їжі». Метод «отруєної їжі» являє собою антимікробний підхід до скринінгу, що включає змішування досліджуваної сполуки з поживним середовищем, у яке згодом додають певний мікроорганізм. Після цього аналізують ступінь пригнічення росту тестових культур [13].

До початку проведення дослідження впливу наносрібла на тест-культури проводилася їх підготовка. Отримання чистої тест-культури відбувалось шляхом пересівання міцелію на чашки Петрі з поживним середовищем Сабуро-агар з інкубуванням протягом 7 днів при температурі 25 ± 1 °C.

Наступним етапом була підготовка розчинів наночастинок срібла у різних концентраціях. Спочатку отримували стерильний розчин концентрованих наночастинок срібла (100 мМ) за допомогою шприцевого фільтра 0,22 мкм. Стерильне наносрібло в початковій концентрації 100 мМ розводили до концентрацій від 0,1 до 10 мМ стерильною дистильованою водою.

Проведення експерименту відбувалося в декілька етапів. Спочатку розігрівалося поживне середовище, та в нього вносилися різні концентрації наночастинок. Далі це поживне середовище розливалось по чашках Петрі та засівалося мікроміцетами. Після цього дослідні зразки інкубувалися при температурі 25 ± 1 °С протягом 7 діб. Результатом був візуальний контроль за зоною затримки росту.

На рис. 2. представлено результати впливу наночастинок срібла на ріст тест-культури *A. alternata*.

У контрольному зразку (рис. 2, а), де наночастки не використовували, *A. alternata* мала інтенсивний ріст колонії, зокрема, вона має значний діаметр, щільну структуру міцелію та рівномірно розвинену поверхню. Це свідчить про сприятливі умови для метаболізму фітопатогена. Гіфи інтенсивно розгалужуються, що дає змогу швидко споживати поживне середовище. Значна площа колонії свідчить про відсутність стресових умов, які могли б перешкоджати грибові синтезувати ферменти та збільшувати біомасу.

На рис. 2, б при дії концентрації 0,1 мМ спостерігали початкові прояви стресової реакції гриба. Попри те, що колонія гриба ще займає доволі значну площу, її морфологічні характеристики починають зазнавати змін. Зокрема, краї колонії стають менш регулярними, а центральна частина демонструє підвищену щільність міцелію. Такі зміни є проявами захисної реакції організму, спрямованої на мінімізацію контакту з токсичними речовинами у середовищі. Хоча концентрація наносрібла на рівні 0,1 мМ є недостатньою для повного припинення росту колонії, вона вже стає достатньою для активації клітинних механізмів детоксикації.

Залежно від зразка, концентрація 1 мМ (рис. 2, в) спричиняє виражену антифунгальну дію, що проявляється істотним уповільненням радіального росту колонії, який приблизно вдвічі менший порівняно з контрольним зразком (рис. 2, а). Наночастки срібла у представленій концентрації виявляють активну дію на термінальні ділянки гіфів, що призводить до їх пошкодження і, як наслідок, значного уповільнення подальшого подовження. В результаті колонія набуває більш пригніченого вигляду, а її потенціал до подальшої колонізації поживного середовища стає істотно обмеженим.

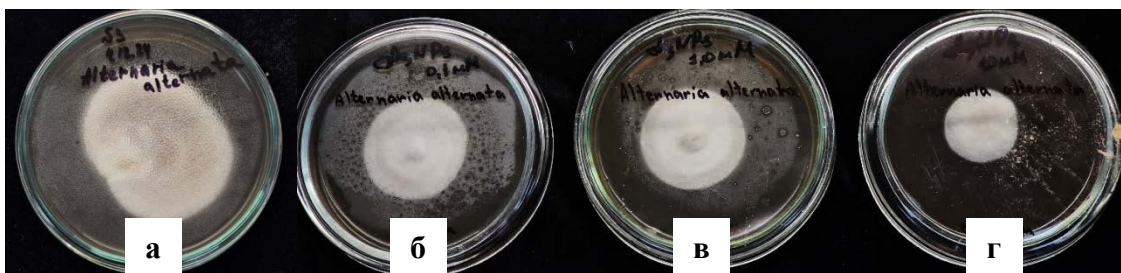


Рис. 2. Вплив різних концентрацій наночастинок срібла на *Alternaria alternata*:
а – контроль; б – 0,1 мМ; в – 1 мМ; г – 10 мМ

Найбільш виражений ефект впливу наночастинок срібла спостерігається за концентрації 10 мМ (рис. 2, г). На зображенні можемо побачити, що ріст міцелію гриба в порівнянні з контролем майже повністю припиняється. Така висока концентрація AgNPs призводить до масштабного пошкодження клітинних мембран і повного блокування ферментативних систем гриба. Така реакція *A. Alternata* на наночастки срібла зумовлена тим, що AgNPs володіють дуже високою поверхневою енергією колоній [2, 3, 14]. При взаємодії з клітинною стінкою гриба вони спричиняють локальне розчинення хітину та глюканів. У результаті утворюються

пошкодження, через які іони Ag^+ проникають у цитоплазму. У межах клітини AgNPs сприяють утворенню активних форм кисню (АФК), включаючи супероксид-радикали та перекис водню. Через те, що гриби володіють обмеженою антиоксидантною системою захисту від впливу металів, запускається ланцюгова реакція руйнування ліпідів, яка фактично призводить до розпаду внутрішніх органел клітини.

Також срібло здатне взаємодіяти з ДНК, утворюючи стабільні комплекси з гуаніном і цитозинном, що фактично блокує процес поділу клітин. Навіть за низької концентрації від 0,1 до 1 мМ (рис. 2, б та 2, в) воно спричиняє виникнення мутацій або зупинку клітинного циклу. Це проявляється, зокрема, у зменшенні діаметра колоній [2, 3, 14].

Результати впливу наночастинок срібла на *F. solani* представлені на рис. 3. У зразку, що не містить наночинку (рис. 3, а), відзначається інтенсивна колонізація субстрату. Гриб утворює симетричну та добре розвинену колонію з характерною радіальною структурою гіф. Міцелій має здоровий вигляд, характеризується достатньою щільністю та безперешкодно поширюється від центральної частини до периферії, що свідчить про сприятливі умови для метаболічної активності фітопатогена.

За результатами дослідження впливу наночастинок срібла у концентрації 0,1 мМ (рис. 3, б) видно характерну зміну росту колонії. Хоча візуально колонія демонструє відносно активне розростання, структура міцелію в порівнянні з контролем (рис. 3, а) стає менш щільною, розрихленою і характеризується частковою втратою однорідності. У такому випадку не можна повністю виключити можливість прояву слабкого стимулювального ефекту, відомого як гормезис, який іноді проявляється за дії низьких концентрацій токсичних речовин. Такий ефект може полягати в збереженні або навіть певному прискоренні радіального росту міцелію за рахунок активації адаптаційних механізмів клітин. Однак відсутність суттєвого збільшення розміру колоній порівняно з контрольним зразком (рис. 3, а) та зменшення щільності міцелію свідчать про те, що найбільш ймовірно є наявність початкового стресового впливу наночастинок срібла, а не стимуляції процесів росту.



Рис. 3. Вплив різних концентрацій наночастинок срібла на *Fusarium solani*:
а – контроль; б – 0,1 мМ; в – 1 мМ; г – 10 мМ

За концентрації 10 мМ (рис. 3, в) інгібувальний ефект значно посилюється. Діаметр колонії помітно зменшується, її структура набуває розрідженого вигляду, а також виявляються ознаки деградації міцелію. Відзначається нерівномірний ріст колонії та часткова втрата морфологічної цілісності. Ці результати свідчать про те, що наночастки срібла починають активно впливати на клітинні мембрани та внутрішньоклітинні процеси, спричиняючи стресові реакції та пошкодження клітин.

Найбільший рівень змін фіксувався за концентрації 100 мМ (рис. 3, г), що відповідає максимальному пригніченню росту *F. solani*. Ріст гриба в порівнянні з концентрацією 10 мМ (рис. 3, в) менший, а колонія має нерівномірні краї росту міцелію. Такий високий рівень AgNPs створює умови, абсолютно несумісні з нормальним життєвим циклом фітопатогена, що призводить до повної деструкції його основних метаболічних шляхів і незворотного руйнування клітинних структур. Дія AgNPs залежить від концентрації і посилюється зі збільшенням дози та тривалості експозиції. При низьких концентраціях домінують поверхневі

ефекти, такі як адгезія та часткове uszkodження мембрани. Зі зростанням концентрації відбуваються масивне проникнення, інтенсивний окислювальний стрес і значні внутрішньоклітинні uszkodження, що зрештою призводить до майже повного знищення міцелію.

Наступні результати впливу наночасток срібла на фітопатогенний мікроміцет *R. solani* представлені на рис. 4.



Рис. 4. Вплив концентрації 1 мМ наночасток срібла на *Rhizoctonia solani*:
а – контроль; б – 1 мМ

Дослідження антифунгальної активності AgNPs демонструє їхній виражений інгібуючий вплив на ріст міцелію фітопатогенного гриба *R. solani*. Порівняння контрольного зразка (рис. 4, а) та дослідного зразка з концентрацією наночасток 1 мМ (рис. 4, б) спостерігали помітні відмінності в морфології та швидкості розвитку колонії. У контрольному зразку гриб характеризується активним радіальним ростом, формуючи густий, пухнастий білосніжний міцелій, який рівномірно покриває поверхню поживного середовища, утворюючи концентричні зони наростання. Натомість під впливом 1 мМ AgNPs (рис. 4, б) фізіологічний стан культури значно змінюється. Ріст міцелію суттєво пригнічується, що проявляється у меншому діаметрі колонії порівняно з контролем. Крім того, структура міцелію стає менш щільною, набуває розрідженого вигляду, а межі колонії стають нечіткими. Це свідчить про руйнівний ефект наночасток на клітинні стінки гіфів і виникнення порушень у метаболічних процесах гриба. Таким чином, отримані результати наочно підтверджують ефективність застосування AgNPs у концентрації 1 мМ як перспективного засобу для інгібування росту *R. solani*.

Ще одні результати впливу наночасток срібла на культуру *N. oryzae* представлені на рис. 5.

У контрольному варіанті (рис. 5, а) фіксували інтенсивне розростання міцелію, що характеризувалося світлою, рівномірною та пухнастою структурою, яка майже повністю заповнювала всю площу чашки Петрі. Це свідчить про створення оптимальних умов для вегетативного розвитку гриба. У дослідному зразку (рис. 5, б), за умов додавання 1 мМ AgNPs, бачимо, що відбулося суттєве пригнічення зростання колонії. Хоча міцелій продовжував поширюватися від центру до периферії, його щільність виявилася значно меншою, структура мала підвищену прозорість, а вміст біомаси був знижений. Особливо помітним ефект уповільнення зростання був у периферійних ділянках чашки, що може бути прояснено створенням наночастками несприятливих умов для активного подовження гіфів.

Отримані результати свідчать про чутливість грибного штаму *N. oryzae* до впливу наночасток срібла, що проявляється у деградації повітряного міцелію та зменшенні загальної швидкості колонізації субстрату. Таким чином, AgNPs можуть розглядатися як потенційно ефективний інгібітор росту для цього виду патогенів, що забезпечує стабільний антифунгальний ефект навіть за невисоких концентрацій активної речовини.

Аналіз результатів впливу концентрації 10 мМ на ізолят (рис. 6, а) свідчить про виражений інгібуючий ефект. Ріст колонії значно обмежується у напрямку до джерела AgNPs, формуючи чітко виражену зону інгібування, де розвиток міцелію майже повністю відсутній.

Колонія має щільну, сплюснену структуру з пригніченням утворення повітряного міцелію та слабкою споруляцією. Краї колонії нерівні та деформовані, що вказує на порушення нормального апікального росту гіф. Така реакція типова для грибів, які проявляють високу чутливість до впливу срібла, оскільки наночастки срібла ефективно руйнують клітинні структури та порушують метаболічні процеси. Ймовірно, цей вид має менш розвинені механізми детоксикації або антиоксидантного захисту, що сприяє нагромадженню активних форм кисню і призводить до серйозного пошкодження клітин.

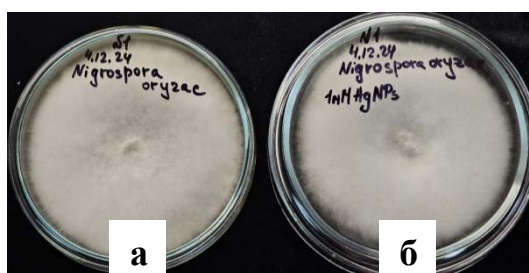


Рис. 5. Вплив концентрації 1 мМ наночастинок срібла на *Nigrospora oryzae*:
а – контроль; б – 1 мМ

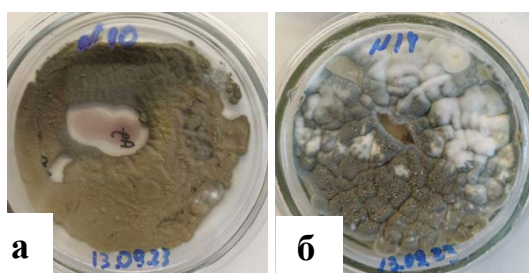


Рис. 6. Вплив концентрації 10 мМ наночастинок срібла на тест-культури, вирощені на чашці Петрі та виділені з листя троянди червоної «Black Magic»

Другий ізолят (рис. 6, б) демонструє істотно вищу стійкість до впливу наночастинок срібла. Попри присутність AgNPs та невеликої зони затримки росту по центру, колонія зберігає активний ріст, практично заповнюючи всю поверхню чашки Петрі. Варто зазначити, що морфологічні характеристики частково змінюються, зокрема формується більш щільна структура, з'являється неоднорідність та можливі ознаки перебудови зонального розподілу. Однак повного інгібування росту колонії не відбувається. Такий феномен свідчить про наявність у цього виду специфічних адаптаційних механізмів, що забезпечують здатність протистояти токсичному впливу срібла.

Таким чином, отримані результати свідчать, що антифунгальна ефективність наночастинок срібла має виражений видовий характер і не є універсальною. Один і той самий агент за однакової концентрації може проявляти мінімальний інгібуючий ефект щодо одних видів грибів і водночас діяти як потужний фунгіцид щодо інших. Це, ймовірно, зумовлено відмінностями у структурі клітинної стінки, метаболічній активності та механізмах захисту мікроміцетів. Отримані дані підкреслюють необхідність індивідуального підбору концентрацій наночастинок срібла для кожного збудника, що є важливим аспектом розробки ефективних і науково обґрунтованих підходів до захисту рослин в агробіотехнології.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило високу антифунгальну активність біогенно синтезованих наночастинок срібла (середній розмір 34,66 нм), отриманих із використанням супернатанту культуральної рідини *Lactobacillus acidophilus* УКМ В-2691, щодо фітопатогенних мікроміцетів.

Результати показали, що наночастки срібла виявляють дозозалежний інгібуючий вплив на всі досліджені тест-культури. Найбільш чутливою виявилася культура *A. alternata*, зокрема,

антифунгальний ефект проявлявся вже при концентрації 1 мМ, а при 10 мМ ріст міцелію майже повністю припинявся. За низьких концентрацій (0,1 мМ) місцями відзначали початкові ознаки стресового впливу або слабого гормезису, що, втім, не переростало в стимуляцію росту. Значну чутливість до AgNPs також продемонстрували *R. solani* та *N. oryzae*, ріст колоній яких дещо пригнічувався при концентрації 1 мМ. У випадку *F. solani* був зафіксований трохи нижчий рівень чутливості, зокрема, виражений інгібуючий ефект проявлявся при концентраціях у межах 1–10 мМ, тоді як максимального пригнічення досягали при 10–100 мМ.

Крім колекційних штамів, наночастки срібла в концентрації 10 мМ ефективно пригнічували ріст одного з ізолятів мікроміцетів, виділених із пошкодженого листа троянд сорту «Black Magic», тоді як інший ізолят проявив високу стійкість. Це свідчить про видові відмінності дії біогенних наночасток срібла та підкреслює важливість індивідуального підходу до їх використання. Отримані результати свідчать про перспективність біогенних наночасток срібла як екологічно безпечнішої альтернативи звичайним хімічним фунгіцидам для захисту сільськогосподарських та декоративних культур від фітопатогенних грибів.

Подальші дослідження варто зосередити на визначенні мінімальних інгібуючих концентрацій для кожного виду патогенів, аналізі ефективності біогенних наночасток срібла порівняно з традиційними фунгіцидами, а також на проведенні випробувань *in vivo* у тепличних і польових умовах із врахуванням фітотоксичності та залишкових речовин. Особливу увагу слід приділити вивченню механізмів стійкості окремих ізолятів, розробленню стабільних препаративних форм і оцінці їхнього впливу на корисну мікробіоту ґрунту. Цей підхід стане основою для створення екологічно безпечних біофунгіцидів нового покоління, здатних забезпечити сталий захист рослин.

Подяка. Автори висловлюють подяку кафедрі біотехнології, шкіри та хутра КНУТД та Фонду Саймонса, грант № SFI PD-Ukraine-00017453 [Шкотова Л.В.] за фінансову підтримку.

References

Література

1. Steinberg, G., & Gurr, S. J. (2020). Fungi, fungicide discovery and global food security. *Fungal genetics and biology*, 144, 103476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2020.103476>.
 2. Mussin, J., & Giusiano, G. (2022). Biogenic silver nanoparticles as antifungal agents. *Frontiers in chemistry*, 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1023542>.
 3. Li, L. et al. (2022). The antifungal activity and mechanism of silver nanoparticles against four plant pathogenic fungi. *Frontiers in Microbiology*, 13, 988633. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.988633>.
 4. Mansoor, S. et al. (2021). Fabrication of silver nanoparticles against fungal pathogens. *Frontiers in nanotechnology*, 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.679358>.
 5. Tariq, M. et al. (2022). Biological synthesis of silver nanoparticles and prospects for agricultural application. *Molecules*, 27(15), 4754. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27154754>.
 6. Srivastava, S., Kadooka, C., & Uchida J. Y. (2018). *Fusarium* species as pathogen on orchids. *Microbiological research*, 207, 188–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.12.002>.
 7. Coleman, J. J. (2015). The *Fusarium solani* species complex: ubiquitous pathogens of agricultural
1. Steinberg G., Gurr S. J. Fungi, fungicide discovery and global food security. *Fungal genetics and biology*. 2020. Vol. 144. Art. 103476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2020.103476>.
 2. Mussin J., Giusiano G. Biogenic silver nanoparticles as antifungal agents. *Frontiers in chemistry*. 2022. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1023542>.
 3. Li L. et al. The antifungal activity and mechanism of silver nanoparticles against four plant pathogenic fungi. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. Art. 988633. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.988633>.
 4. Mansoor S. et al. Fabrication of silver nanoparticles against fungal pathogens. *Frontiers in nanotechnology*. 2021. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.679358>.
 5. Tariq M. et al. Biological synthesis of silver nanoparticles and prospects for agricultural application. *Molecules*. 2022. No. 27(15). Art. 4754. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27154754>.
 6. Srivastava S., Kadooka C., Uchida J. Y. *Fusarium* species as pathogen on orchids. *Microbiological research*. 2018. Vol. 207. P. 188–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.12.002>.
 7. Coleman J. J. The *Fusarium solani* species complex: ubiquitous pathogens of agricultural importance.

- importance. *Molecular plant pathology*, 17(2), 146–158. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.12289>.
8. Alasadi, R. M. S. (2024). *Alternaria alternata*: the most common pathogen on date palm. *Studies in fungi*, 9, e012. DOI: <https://doi.org/10.48130/sif-0024-0012>.
9. DeMers, M. (2022). *Alternaria alternata* as endophyte and pathogen. *Microbiology*, 168(3). DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.001153>.
10. Hendel, P. et al. (2022). *Rhizoctonia solani* AG5 and its offspring – morphology and sensitivity to fungicides. *Acta mycologica*, 57, 578. DOI: <https://doi.org/10.5586/am.578>.
11. Tao, Y. et al. (2024). New occurrence of *Nigrospora oryzae* causing leaf blight in ginkgo biloba in china and biocontrol screening of endophytic bacteria. *Microorganisms*, 12(11), 2125. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112125>.
12. Abubakar, A. Y. et al. (2026), Wound-dependent infection by *Nigrospora oryzae* causes sugarcane leaf spot: pathogen characterization and fungicide sensitivity. *Frontiers in plant science*, 16, 1742944. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1742944>.
13. Hossain, T. J. (2024). Methods for screening and evaluation of antimicrobial activity: a review of protocols, advantages, and limitations. *European journal of microbiology and immunology*, 14(2), 97–115. DOI: <https://doi.org/10.1556/1886.2024.00035>.
14. Daniel, A. I., Smith, E., Al-Hashimi, A., Gokul, A., Keyster, M., & Klein, A. (2024). Mechanistic insight into the anti-alternaria activity of bimetallic zinc oxide and silver/zinc oxide nanoparticles. *Heliyon*, 10(10), e31330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31330>.
- Molecular plant pathology*. 2015. No. 17 (2). P. 146–158. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.12289>.
8. Alasadi R. M. S. *Alternaria alternata*: the most common pathogen on date palm. *Studies in fungi*. 2024. No. 9. Art. e012. DOI: <https://doi.org/10.48130/sif-0024-0012>.
9. DeMers M. *Alternaria alternata* as endophyte and pathogen. *Microbiology*. 2022. No. 168 (3). DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.001153>.
10. Hendel P. et al. *Rhizoctonia solani* AG5 and its offspring – morphology and sensitivity to fungicides. *Acta mycologica*. 2022. Vol. 57. Art. 578. DOI: <https://doi.org/10.5586/am.578>.
11. Tao Y. et al. New occurrence of *Nigrospora oryzae* causing leaf blight in ginkgo biloba in china and biocontrol screening of endophytic bacteria. *Microorganisms*. 2024. No. 12 (11). Art. 2125. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112125>.
12. Abubakar A. Y. et al. Wound-dependent infection by *Nigrospora oryzae* causes sugarcane leaf spot: pathogen characterization and fungicide sensitivity. *Frontiers in plant science*. 2026. Vol. 16. Art. 1742944. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1742944>.
13. Hossain T. J. Methods for screening and evaluation of antimicrobial activity: a review of protocols, advantages, and limitations. *European journal of microbiology and immunology*. 2024. Vol. 14, Iss. 2. P. 97–115. DOI: <https://doi.org/10.1556/1886.2024.00035>.
14. Daniel A. I., Smith E., Al-Hashimi A., Gokul A., Keyster M., Klein A. Mechanistic insight into the anti-alternaria activity of bimetallic zinc oxide and silver/zinc oxide nanoparticles. *Heliyon*. 2024. No. 10 (10). Art. e31330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31330>.

POTUPA VLADYSLAVA

Student, Department of Biothecnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-4728-1027>
E-mail: vladislavapotupa@gmail.com

MAISTRENKO LESIA

PhD, Associate Professor,
Department of Biothecnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1643-305X>
Scopus Author ID: 57189215148
ResearcherID: ABE-8214-2020
E-mail: mavstrenko.la@knutd.edu.ua

HUSEINOVA KRISTINA

Student, Department of Biothecnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-6684-7329>
E-mail: kgusejnova626@gmail.com

SHKOTOVA LYUDMYLA

Senior Research Scientist,
Institute of Molecular Biology and Genetics National
Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2594-0413>
Scopus Author ID: 8206833100
ResearcherID: D-6353-2018
E-mail: luda_shkotova@yahoo.com

VOLOSHYNA IRYNA

PhD, Associate Professor,

Department of Biothecnology, Leather and Fur,

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-8125-8817>

Scopus Author ID: 8264131600

E-mail: wirn@ukr.net

Vladyslava POTUPA¹, Kristina HUSEINOVA¹, Lesia MAISTRENKO¹,
Lyudmyla SHKOTOVA², Iryna VOLOSHYNA¹

¹Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

²Institute of Molecular Biology and Genetics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

BIOGENIC SILVER NANOPARTICLES AS A TOOL FOR ANTIFUNGAL CONTROL AND ENVIRONMENTAL BIOSAFETY

Purpose. To determine the antifungal activity of biogenic silver nanoparticles synthesized using the cell-free supernatant of *Lactobacillus acidophilus* UCM B-2691 against the test cultures *Fusarium solani*, *Alternaria alternata* 3043, *Rhizoctonia solani* 16036, *Nigrospora oryzae* 15966, as well as micromycetes isolated from damaged leaves of the rose cultivar "Black Magic".

Methodology. Biogenic synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) was carried out using the cell-free supernatant of *Lactobacillus acidophilus* UCM B-2691 culture broth. The average size of the synthesized nanoparticles was determined using photon correlation spectroscopy and was 34.66 nm. The poisoned food technique on Sabouraud agar evaluated the antifungal activity of AgNPs. Silver nanoparticles were added to the nutrient medium at concentrations of 0.1, 1, 10, and 100 mM. The test cultures were incubated at 25 ± 1 °C for 7 days. The evaluation of antifungal activity was performed visually by comparing the size, morphology, and density of colonies with the control (without AgNPs). Collection strains from the Institute of Microbiology and Virology named after D.K. Zabolotny of the National Academy of Sciences of Ukraine, and isolates obtained from rose leaves were used in the study.

Findings. Biogenic silver nanoparticles demonstrated a pronounced dose-dependent antifungal activity against all tested phytopathogenic micromycetes. The highest sensitivity was shown by *Alternaria alternata* 3043: significant growth inhibition was observed already at a concentration of 1 mM, while at 10 mM the mycelial growth was almost completely inhibited. At 0.1 mM, only initial signs of stress were noted. The growth of *Rhizoctonia solani* and *Nigrospora oryzae* was also notably suppressed at 1 mM. *Fusarium solani* exhibited lower sensitivity: a pronounced inhibitory effect was observed at concentrations of 1–10 mM, with maximum suppression at 10–100 mM. Among the isolates from rose leaves of the «Black Magic» cultivar, one demonstrated high sensitivity to 10 mM AgNPs, while the other showed considerable resistance.

Originality. For the first time, the antifungal activity of biogenic silver nanoparticles synthesized using the cell-free supernatant of *Lactobacillus acidophilus* UCM B-2691 was investigated against a complex of phytopathogenic micromycetes, including isolates from damaged rose leaves. Species-specific differences in the sensitivity of the tested pathogens were established, and the dose-dependent nature of the inhibitory effect of the nanoparticles was demonstrated.

Practical value. The obtained results indicate the feasibility of using biogenic silver nanoparticles as a promising agent for protecting plants from phytopathogenic micromycetes. Their application can contribute to reducing the use of traditional chemical fungicides, decreasing the environmental load, and minimizing the accumulation of toxic residues in plant products. The established patterns of AgNPs action can serve as a basis for the further development of effective biofungicidal preparations.

Keywords: biogenic synthesis; silver nanoparticles; *Lactobacillus acidophilus*; micromycetes; phytopathogens; antifungal activity.