








<https://doi.org/10.15407/ukrbotj82.02.171>

RESEARCH ARTICLE

Вплив передпосівної обробки наночастинками срібла та міді на лектин-залежні адаптивні реакції *Triticum aestivum* (*Poaceae*) до збудника очкової плямистості *Oculimacula yallundae* (*Helotiales*, *Ascomycota*)

Юлія М. ПИСЬМЕННА * , Ольга О. ПАНЮТА ,
Вікторія Н. БЕЛАВА , Ольга П. ОЛЬХОВИЧ , Наталія Ю. ТАРАН 
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННЦ "Інститут біології та медицини",
вул. Володимирська 64/13, Київ 01601, Україна

* Автор для листування: pismennaya64@gmail.com

Реферат. Досліджено морфометричні параметри та лектинову активність проростків м'якої озимої пшениці (*Triticum aestivum*), інкульованих суспензією конідій гриба-збудника очкової плямистості (*Oculimacula yallundae*), за умов передпосівної обробки наночастинками срібла та міді. Показано, що така обробка насіння двох різних за стійкістю сортів пшениці (сприйнятливого 'Миронівська 808' і відносно стійкого 'Renan') впливає на ріст проростків обох сортів, вміст білка та лектинову активність різних клітинних фракцій. Встановлено, що лектинова активність фракцій клітинних стінок і клітинних органел проростків пшениці за інфікування та передпосівної обробки була вищою, ніж у неінфікованих проростків. Динаміка лектинової активності різних клітинних фракцій внаслідок інфікування відрізнялася. Реакція-відповідь була більш вираженою у проростків відносно стійкого до патогена сорту 'Renan'. Передпосівна обробка наночастинками Ag і Cu індукувала лектин-залежні захисні реакції проростків пшениці обох досліджуваних сортів. Отримані результати є перспективними для подальшого вивчення та використання наночастинок металів для захисту рослин від біотичних та абіотичних чинників.

Ключові слова: *Pseudocercospora herpotrichoides*, білок, індекс толерантності, лектинова активність, морфометрія, наночастинки, озима пшениця, патоген

Вступ

Однією з найнебезпечніших хвороб зернових культур є очкова плямистість, або церкоспорельоз, чи прикоренева церкоспорельозна гниль,

яка спричиняє вилягання пшениці, ячменю і жита. Зараження рослин відбувається весною у фазі виходу в трубку. Активному розвитку хвороби сприяють волога холодна осінь, м'яка зима та прохолодна весна з опадами (Vusatyy, 2005).

ARTICLE HISTORY. Submitted 24 September 2024. Revised 24 April 2025. Published 29 April 2025

CITATION. Pysmenna Yu.M., Panyuta O.O., Belava V.N., Olkhovych O.P., Taran N.Yu. 2025. Effect of pre-sowing treatment with silver and copper nanoparticles on the lectin dependent adaptive reactions of *Triticum aestivum* (*Poaceae*) to the eyespot causal agent *Oculimacula yallundae* (*Helotiales*, *Ascomycota*). *Ukrainian Botanical Journal*, 82(2): 171–185. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj82.02.171>

© M.G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine, 2025

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2025

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

В Україні перші повідомлення про очкову плямистість з'явилися ще в 1960-х роках (Dzumbabaev, 1963). У 2007 р. хвороба була поширена в Західному Лісостепу (Kryuchkova, 2007), а вже за кілька років — на території всієї країни (Kryuchkova, 2013).

Це одна з хвороб пшениці, яку викликає гриб *Oculimacula yallundae* (Wallwork & Spooner) Crous & W. Gams, відомий згідно з даними *Mycobank* (<https://www.mycobank.org/>) також за такими синонімічними назвами: *Cercospora herpotrichoides* Fron, *Helgardia herpotrichoides* (Fron) Crous & W. Gams, *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton, *Ramulispora herpotrichoides* (Fron) Arx i *Tapesia yallundae* Wallwork & Spooner.

Використання фунгіцидів для захисту рослин від *O. yallundae* з часом втрачає ефективність, оскільки патоген набуває стійкості до них. Виникає необхідність додаткового використання хімічних препаратів, що збільшує забруднення навколишнього середовища. Крім того, гриб зберігається у рештках рослин, які згодом виступають джерелом інфекції. На сьогодні абсолютно імунних до збудника очкової плямистості сортів пшениці немає (Vusatyy, 2005).

У пошуках альтернативних засобів захисту рослин науковці використовують різноманітні підходи, а саме створення генетично захищених сортів (Vusatyy, 2005), застосування мікробіологічних препаратів (Kravchenko et al., 2014) і використання водних розчинів нанодисперсних частинок металів (Lopatko, 2012).

Практичне застосування наночастинок обумовлене їхніми унікальними властивостями: антибактеріальними, антифунгальними, протівірусними і ріст-стимулюючими (Chekman, 2009; Belava et al., 2017; Rizwan et al., 2017; Mansoor et al., 2021; Tortella et al., 2024). Використання наночастинок металів для передпосівної обробки насіння стимулює стійкість рослин до збудників хвороб і несприятливих факторів середовища, підвищує їхню продуктивність і сприяє отриманню екологічно чистої продукції (Masarovičová, Králová, 2013; Taran et al., 2016). Наночастинки біогенних металів (Cu, Fe, Mn, Zn) та Ag активізують антиоксидантні системи, пригнічують утворення та накопичення продуктів окиснення ліпідів, спричинені патологічним процесом за інфікування *O. yallundae* (Panyuta et al., 2016). Індуковану наночастинками металів стійкість рослин пшениці до збудника

очкової плямистості можна оцінити за ростовими та фізіологічними параметрами, які відображають їхній стан за певних умов середовища (Lacko-Bartosova et al., 2010; Qiu et al., 2018).

Важливе значення у захисті рослин від патогенів належить лектинам і лектиноподібним білкам (Hwang, Hwang, 2011), які взаємодіють з поверхнею бактеріальних клітин, спор і гіф грибів, внаслідок чого зупиняється їхній ріст і блокується розвиток патологічного процесу (Kim et al., 2015; Moradi et al., 2021). Дослідження антибактеріальної та антифунгальної активності лектинів показують, що мінімум дві третини загальної кількості цих рослинних білків і понад 90% досліджених лектинів рослин родини *Fabaceae* виявляють бактерицидну та бактеріостатичну активність. Більшість лектинів продемонстрували антибіотичні властивості широкого спектра дії, які охоплюють грампозитивні та грамнегативні бактерії. Основною умовою токсичності рослинного лектину для грибів є спроможність перехресно зв'язувати/зшивати поверхневі глікокон'югати клітини патогена, в першу чергу молекули хітину. Зв'язування відбувається в разі активації кількох активних центрів багатовалентної молекули лектину і призводить до загибелі клітини патогена або інгібування росту гриба (Konozy et al., 2022).

Відмічено суттєве збільшення активності рослинних лектинів не тільки за умов інфікування *O. yallundae*, а й як відповідь здорових проростків на обробку неіоногенним розчином наночастинок металів (Ag, Cu, Fe, Mn, Zn) (Panyuta et al., 2016). Це вказує на можливість превентивного використання наночастинок для передадаптивної індукції ендогенних захисних реакцій на можливу патогенну інфекцію (на гіпотетичну загрозу патогенезу).

Захисна функція лектинів реалізується двома шляхами — через безпосередній контакт із відповідними вуглеводними рецепторами на поверхні чутливої клітини (аглютинація та адгезія), або через опосередкований рецепторами мембрани сигнальний шлях, в основі якого лежить здатність лектину запускати складний ланцюг внутрішньоклітинних перетворень та індукувати реакцію-відповідь (Rudiger, Gabius, 2001).

Захист клітин рослин від хітинвмісних фітопатогенів, до яких належить і *O. yallundae*, обумовлений специфічністю лектинів до мономера (N-ацетил-D-глюкозаміну (GlcNAc) і олігомерів

хітину, які містяться в клітинній стінці патогена (Mamenko, 2014; Pusztahelyi, 2018). Крім того, захисні функції лектинів полягають у передачі сигналів на клітинному рівні. Це пов'язано з іонними потоками, які є результатом зміни проникності мембран при зв'язуванні мономерів клітинних оболонки фітопатогенів лектинами рослин (Belava et al., 2009). Як наслідки такого сигналіngu в клітині відбуваються зміни в експресії генів; зокрема, показано активацію експресії генів лектинів, синтез *de novo* та накопичення відповідних мРНК, а також пригнічення експресії генів і суттєве падіння рівня мРНК дефензинів на початкових етапах патогенезу (Belava et al., 2010).

Метою нашої роботи було дослідити зміни морфометричних параметрів та лектинової активності (ЛА) різних клітинних фракцій проростків озимої пшениці за обробки наночастинками Ag і Cu та інфікування *Oculimacula yallundae* для оцінки індукції стійкості до патогена.

Матеріали та методи

Матеріалом дослідження були два різних за стійкістю до *Oculimacula yallundae* сорти озимої м'якої пшениці (*Triticum aestivum* L.): сприйнятливий сорт вітчизняної селекції 'Миرونівська 808' і відносно стійкий зарубіжної селекції 'Renan', який містить ген *Pch1* — один із відомих генів стійкості до гриба (Liatukas, Ruzgas, 2008). Таку модель широко використовують у фітопатологічних дослідженнях.

Простерилізоване насіння пшениці обох сортів замочували у колоїдних розчинах наночастинок Ag і Cu (1 частина колоїдного розчину наночастинок : 100 частин води — концентрація, рекомендована виробником) упродовж 4 год, потім відмивали дистильованою водою і поміщали на добу в термостат за температури 25 °C. Контролем було насіння, замочене у дистильованій воді.

Колоїдні розчини наночастинок біогенних металів Ag і Cu отримали шляхом диспергування гранул відповідних металів імпульсами електричного струму з амплітудою 100–2000 А у воді (Lopatko et al., 2009). Максимальний розмір наночастинок не перевищував 100 нм. Вміст наночастинок у колоїдних розчинах становив: Ag+Ag₂O — 0,75 мг/л, Cu — 0,37 мг/л. Препарати були надані кафедрою технології

конструкційних матеріалів і матеріалознавства Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Проростки (по 100 одиниць) вирощували в хімічно-нейтральних контейнерах (9 × 8 × 8 см) на 4/5 висоти наповнених кварцовим піском (марка ВС-050-2 за ГОСТ 22551–77, фракція № 4) в лабораторних умовах за 16-годинного фотоперіоду, інтенсивності освітлення 2–3 клк, температури повітря 25/20 °C (день/ніч) та вологості повітря 60%. Постійну вологість субстрату (70%) підтримували додатковим внесенням живильного середовища Хогланда-Арнона (Hoagland, Arnon, 1950).

7-добові проростки пшениці інфікували суспензією конідій (титр 5–7 × 10⁴ КУО/см³) високівірulentного штаму 543 7/1 *O. yallundae* (Belava et al., 2009), наданого лабораторією імунітету сільськогосподарських рослин до хвороб Інституту захисту рослин НААН України.

Вимірювання досліджуваних показників проводили через 24, 48, 72, 96 та 120 год після інфікування.

Площу листової пластинки першого справжнього листка визначали за формулою (Anikeev, Kutuzov, 1961):

$$S = 2/3 \times R \times x,$$

де S — площа листової пластинки, см²; R — ширина листка біля основи, см; x — довжина листка, см.

Індекс толерантності (ІТ, %) вираховували за співвідношенням довжини (маси) надземної та підземної частин проростків дослідного і контрольного варіантів (Wilkins, 1978):

$$ІТ = \frac{\text{довжина (маса) надземної (підземної) частини досліду}}{\text{довжина (маса) надземної (підземної) частини контролю}} \times 100\%$$

Активність лектиноподібних білків визначали у двох фракціях: клітинних стінок (КС) та клітинних органел (КО). Лектиноподібні білки виділяли за стандартним методом з нашими модифікаціями (замінили фільтрування через паперовий фільтр на центрифугування) (Pysmenpa et al., 2014).

Лектинову активність визначали методом ратусеритроаглютинації (Pogorila et al., 2002) та розраховували як значення, обернене до мінімальної концентрації білка, що спричинила аглютинацію еритроцитів щура.

Вміст загального білка визначали за методом Бредфорда (Bradford, 1976).

Біологічна повторність дослідів 3-разова, аналітична — 9-разова. В роботі представлені середні дані, відмінності між варіантами дослідів вважали вірогідними при рівні значимості $P \leq 0,05$ за критерієм Стьюдента (програмний пакет Microsoft Excel).

Результати та обговорення

Інформативним маркером фізіологічного стану рослин є їхній ріст, тому гальмування або прискорення росту є ознакою стресового стану. Реакцію проростків пшениці двох досліджуваних сортів на дію наночастинок Ag і Cu та інфікування суспензією конідій *O. yallundae*, а також на сумісну дію наночастинок цих металів із збудником очкової плямистості, оцінювали за зміною приросту довжини та маси пагонів і коренів і виражали як ІТ. Індекс толерантності коливався впродовж дослідження в усіх варіантах дослідів (табл. 1).

У проростків пшениці сорту 'Миронівська 808' упродовж перших двох діб спостерігали зменшення приросту листків відносно контролю, що підтверджують значення ІТ за довжиною і масою. Це свідчить про негативний вплив досліджуваних чинників на ріст листків у проростків цього сорту. Проте, на 120-ту годину значення ІТ становило близько 100%, що може бути результатом вмикання адаптивних механізмів у рослин на дію наночастинок металів (Ag або Cu) і/або збудника очкової плямистості.

Ростова реакція коренів проростків сорту 'Миронівська 808' на дію досліджуваних чинників дещо відрізнялася. Спостерігали поступову стимуляцію росту коренів. На 120-ту годину дослідів довжина коренів зростала на 32, 21 і 19% за обробки наночастинами Ag і Cu та інокуляції *O. yallundae* відповідно. Сумісна дія інфікування та наночастинок металів спричиняла зростання ІТ на 46% за обробки Ag і на 25% за обробки Cu. Маса коренів проростків 'Миронівська 808' у разі використання наночастинок Ag або Cu була на рівні контролю, тоді як інокуляція суспензією конідій *O. yallundae* спричиняла зниження маси на 26% відносно контролю. Таким чином, одночасно з видовженням коренів, за інфікування відмічено зниження їхньої маси, що може бути наслідком синтезу патогеном ауксиноподібних регуляторів росту рослин, які можуть індукувати саме такий ріст.

У проростків пшениці 'Renan' виявлений на 24-ту годину ріст-стимулюючий вплив усіх досліджуваних чинників на листки поступово нівелювався і на 120-ту годину значення ІТ становило близько 100%; відповідно, суттєвий вплив не виявлений. Проте через 120 год передпосівна обробка наночастинами Ag спричиняла зростання маси листків на 25%, а інокуляція суспензією конідій гриба — на 17% відносно контролю. Такі зміни показників ростових процесів підтверджують короточасний стимулюючий вплив гриба на тканини рослини-хазяїна з метою залучення/накопичення біомаси для підготовки до репродуктивного періоду (Rapunuta et al., 2018). У проростків пшениці цього сорту спостерігали пригнічення росту коренів на 11% за обробки наночастинами Cu, тоді як за обробки наночастинами Ag або інокуляції суспензією конідій гриба статистично достовірних змін не виявили. Маса коренів проростків пшениці 'Renan' у разі використання наночастинок Ag або Cu була на рівні контролю, а інфікування стимулювало зростання цього показника на 69% у порівнянні з контролем.

За сумісної дії наночастинок металів (Ag або Cu) і збудника очкової плямистості відмічено сортоспецифічний вплив на ріст проростків пшениці досліджуваних сортів. Значення ІТ проростків 'Renan' на 120-ту годину було наближене до 100%, тоді як для проростків 'Миронівська 808' виявлено зростання цього показника. Це свідчить про індукцію наночастинами і Ag, і Cu (у разі передпосівної обробки насіння) захисних реакцій у проростків пшениці досліджуваних сортів. Слід зазначити, що у проростків 'Renan' за сумісної дії наночастинок металів і патогена значення індексу ІТ нижчі, ніж у проростків сприйнятливої сорту 'Миронівська 808'. При цьому значення ІТ відрізнялися залежно від органу: ІТ за довжиною був суттєво більшим у коренях (з 48-ї години), а ІТ за масою — в листках (з 72-ї години). Таким чином, сумісний вплив інфікування та наночастинок спричинював не тільки сортоспецифічні, а й органоспецифічні відповіді рослинного організму.

Важливе значення для росту рослин і реалізації генетично-детермінованого потенціалу продуктивності має площа поверхні основного органу фотосинтезу — листка.

Згідно з результатами, представленими в табл. 2, передпосівна обробка насіння пшениці

Таблиця 1. Індекс толерантності різних частин проростків озимої пшениці, інфікованих *Oculimacula yallundae*, за обробки наночастинками Ag і Cu *Table 1. Tolerance index of various parts of winter wheat seedlings infected with *Oculimacula yallundae* and under the action of Ag and Cu nanoparticles *

Індекс толерантності за довжиною, %										
Варіант	Листки					Корені				
	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год
'Миронівська 808'										
Д/К	83	102	107	93	97	84	99	118	94	119
К+Ag/К	97 [#]	92 [#]	115 [#]	108 [#]	95	99 [#]	95	127 [#]	106 [#]	132 [#]
К+Cu/К	98 [#]	90 [#]	109	94	99	99 [#]	104 [#]	105 [#]	87 [#]	122
Д+Ag/К	92 [#]	102	100 [#]	100 [#]	107 [#]	89 [#]	117 [#]	112 [#]	116 [#]	146 [#]
Д+Cu/К	98 [#]	101	113 [#]	106 [#]	104 [#]	90 [#]	118 [#]	135 [#]	119 [#]	125 [#]
'Renan'										
Д/К	109	105	110	95	95	90	105	88	96	100
К+Ag/К	107	104	108	96	96	106 [#]	99 [#]	114 [#]	95	99
К+Cu/К	116 [#]	106	107	97	98	91	90 [#]	98 [#]	91 [#]	89 [#]
Д+Ag/К	109	106	107	113 [#]	103 [#]	99 [#]	104	94 [#]	85 [#]	104
Д+Cu/К	114 [#]	103	115 [#]	106 [#]	100 [#]	97 [#]	96 [#]	86	95	95 [#]
Індекс толерантності за масою, %										
Варіант	Листки					Корені				
	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год
'Миронівська 808'										
Д/К	77	85	96	101	100	76	67	91	76	74
К+Ag/К	107 [#]	91 [#]	142 [#]	133 [#]	101	124 [#]	81 [#]	123 [#]	131 [#]	96 [#]
К+Cu/К	94 [#]	78 [#]	124 [#]	107 [#]	106 [#]	104 [#]	68 [#]	102 [#]	99 [#]	104 [#]
Д+Ag/К	81	94 [#]	108 [#]	111 [#]	117 [#]	83 [#]	86 [#]	100 [#]	113 [#]	130 [#]
Д+Cu/К	94 [#]	94 [#]	133 [#]	128 [#]	104	83 [#]	100 [#]	114 [#]	113 [#]	90 [#]
'Renan'										
Д/К	99	115	111	118	117	90	111	104	175	169
К+Ag/К	103 [#]	112	103 [#]	113	89 [#]	102 [#]	112	100	161 [#]	95 [#]
К+Cu/К	107 [#]	103 [#]	100 [#]	90 [#]	96 [#]	113 [#]	96 [#]	95 [#]	133 [#]	100 [#]
Д+Ag/К	107 [#]	117	105 [#]	139 [#]	125 [#]	129 [#]	100 [#]	113 [#]	200 [#]	183 [#]
Д+Cu/К	107 [#]	106 [#]	116	122	90 [#]	114 [#]	89 [#]	100	117 [#]	117 [#]

* Тут і в наступних таблицях позначено: К — контроль, Д — дослід (інфіковані проростки); # позначено статистично значимі відмінності.

досліджуваних сортів наночастинками Ag, інокуляція проростків суспензією конідій *O. yallundae* та сумісна дія наночастинок металів (Ag або Cu) і збудника очкової плямистості спричиняли збільшення площі листової пластинки проростків.

У проростків пшениці 'Миронівська 808' площа листової пластинки порівняно з контролем достовірно збільшувалася за обробки наночастинками Ag (на 72-гу, 96-ту години) та інокуляції суспензією конідій збудника очкової плямистості (на 48-му, 72-гу години), тоді як у разі використання наночастинок Cu достовірної різниці не виявлено. Сумісна дія наночастинок

металів і патогена на 120-ту годину сприяла збільшенню площі листової пластинки на 20,5% за обробки Ag і 17,0% за обробки Cu порівняно з контролем, отриманим із насіння, необробленого наночастинками.

Для проростків пшениці 'Renan' статистично достовірні зміни площі листової пластинки виявлені за інокуляції збудником очкової плямистості на 24-ту і 96-ту години (на 17,0 та 16,8% відповідно). За обробки наночастинками Ag статистично достовірні зміни зареєстровано на 72-гу годину (зростання на 13,2%). За обробки наночастинками Cu статистично

Таблиця 2. Площа листової пластинки першого справжнього листка проростків озимої пшениці за інфікування *Oculimacula yallundae* та дії наночастинок Ag і CuTable 2. Leaf area of the first true leaf of winter wheat seedlings infected with *Oculimacula yallundae* and under the action of Ag and Cu nanoparticles

Варіант	Площа листової пластинки, см ²				
	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год
'Миронівська 808'					
К	3,63±0,17	4,14±0,11	4,42±0,13	4,68±0,15	5,22±0,16
К+Ag	3,82±0,14	4,02±0,17	5,04±0,16 [#]	5,58±0,20 [#]	5,69±0,19
К+Cu	3,49±0,11	4,05±0,10	4,27±0,17	4,74±0,19	5,14±0,20
Д	3,29±0,18	3,76±0,12 [#]	3,76±0,11 [#]	4,92±0,18	5,68±0,20
Д+Ag	3,79±0,08	4,08±0,15	4,22±0,19	5,27±0,23 [#]	6,29±0,24 [#]
Д+Cu	4,04±0,16	4,06±0,12	4,76±0,22	5,58±0,22 [#]	6,11±0,20 [#]
'Renan'					
К	2,83±0,10	3,57±0,13	3,65±0,15	3,89±0,17	4,27±0,15
К+Ag	2,97±0,11	3,92±0,18	4,13±0,15 [#]	4,17±0,16	4,47±0,21
К+Cu	2,94±0,14	3,93±0,16	4,03±0,15	4,05±0,14	4,37±0,17
Д	3,31±0,15 [#]	3,88±0,15	3,97±0,17	4,51±0,19 [#]	4,75±0,21
Д+Ag	3,32±0,15 [#]	4,09±0,18 [#]	4,51±0,19 [#]	5,26±0,18 [#]	5,29±0,22 [#]
Д+Cu	3,37±0,12 [#]	3,69±0,15	3,98±0,15	4,69±0,20 [#]	4,85±0,18 [#]

достовірних змін упродовж експерименту не виявлено. У разі сумісної дії наночастинок металів і патогена ріст-стимулюючий ефект, порівняно з контролем, спостерігався впродовж дослідження і на 120-ту годину був більшим за використання наночастинок Ag (23,9%), ніж наночастинок Cu (13,6%).

Порівняльна оцінка двох різних за стійкістю сортів показала, що площа листової пластинки, а опосередковано і потенційна продуктивність рослин, не змінювалися за дії наночастинок Cu, а за дії наночастинок Ag збільшувалися лише для сорту 'Миронівська 808'. Інфікування проростків пшениці *O. yallundae* викликало збільшення площі листової пластинки у проростків обох сортів. За сумісної дії патогена та наночастинок металів збільшення площі листової пластинки в обох сортів відмічене у разі використання Ag, а захисний вплив Cu проявився тільки для сорту 'Миронівська 808'.

Отримані дані узгоджуються з результатами попередніх наукових досліджень. Так, було показано, що за обробки наночастинами срібла знижуються показники схожості насіння, сповільнюється ріст і приріст сирої ваги коренів та гіпокотилу, зменшується вміст хлорофілів, загального білка та цукрів (Cvjetko et al., 2017; Pittol et al., 2017; Al-Huqail et al., 2018), індукується реактивний окислювальний стрес, інгібуються процеси фотосинтезу (асиміляція CO₂),

знижується продуктивність рослин (Das et al., 2018), знижуються індукований мітотичний індекс і активність антиоксидантної системи, спричинюється окиснювання ДНК (Cvjetko et al., 2017). Загальна токсичність сполук срібла може провокувати зміни морфометричних показників, маси рослини (показано на модельних рослинах м'якої пшениці, сорго та ін.). Найбільший регуляторний ефект спостерігається на початкових етапах розвитку рослин (Matras et al., 2022).

Встановлено, що залежно від дози обробка наночастинами Cu або не позначається на показниках росту й розвитку, або виявляється на пізніших етапах онтогенезу, а саме впливає на якість плодів (індукує накопичення біологічно активних сполук: вітаміну С, лікопіну, фенолів, флавоноїдів) та індукує більшу антиоксидантну здатність, зокрема підвищує активність основних ферментів — каталази і супероксиддисмутази (López-Vargas et al., 2018). Зазначається, що з досліджених однодольних рослин пшениця є набагато менш чутливою до присутності наночастинок міді порівняно з рисом або кукурудзою, і результат залежить від способу внесення наночастинок і балансу показників концентрації та умов вирощування (Feigl, 2023). Низькі концентрації наночастинок підвищували показники росту і продуктивності (Yasmeen et al., 2018; Badawy et al., 2021), більш високі концентрації часто гальмують ріст рослин пшениці

(Dimkra et al., 2012; Kacziba et al., 2023). Таким чином, як і в нашому досліді, для різних сортів пшениці (і залежно від умов обробки і вирощування) показано, що одна й та сама доза наночастинок Cu може ініціювати стимулюючі або інгібуючі процеси.

Важливим показником життєздатності рослин є вміст білка. Флуктуації рівня білка впродовж росту свідчать про його синтез *de novo* (Raikhel et al., 1984). Зміни умов навколишнього середовища, внесення добрив, обробка регуляторами росту, пестицидами, дія біотичних та абіотичних чинників впливають на кількісний вміст білка і спричиняють значні коливання цього показника. Тому зміни вмісту загального білка за патогенезу є складовою комплексу захисних реакцій рослинного організму (Ferreira et al., 2007; Dos Santos, Franco, 2023).

У контролі та за інфікування вміст загального білка у фракціях КС і КО у листках і коренях проростків 'Renan' був нижчим, ніж у проростків 'Миронівська 808' (табл. 3).

Передпосівна обробка наночастинками Ag і Cu не спричиняла достовірних змін у вмісті білка в обох клітинних фракціях проростків досліджуваних сортів.

За сумісної дії наночастинок металів (Ag або Cu) і збудника очкової плямистості зміни вмісту білка в більшості дослідних варіантів були на рівні похибки, і будь-якої залежності не простежувалось.

Визначення лектинової активності проростків пшениці різних за стійкістю до збудника очкової плямистості сортів у контрольному варіанті показало, що у проростків сорту 'Миронівська 808' лектинова активність фракції клітинних стінок і фракції клітинних органел була вищою у коренях (рис. 1А, 1С, 2А, 2С). Подібну тенденцію спостерігали у проростків сорту 'Renan' для лектинової активності фракції клітинних органел (рис. 2В, 2D), а лектинова активність фракції клітинних стінок у коренях була вищою впродовж перших 48 год (рис. 1В, 1D). Отримані результати узгоджуються з даними Raikhel et al. (1984), згідно з якими у коренях міститься більша кількість лектинів, ніж у стеблах і листках.

Порівняння лектинової активності різних клітинних фракцій проростків пшениці, відмінних за чутливістю/сприйнятливостю до збудника очкової плямистості сортів, показало, що

проростки досліджуваних сортів відрізнялися за величиною лектинової активності в коренях і листках. Лектинова активність обох фракцій у коренях була вищою у сорту 'Миронівська 808', а у листках — у 'Renan'.

Інокуляція суспензією конідій збудника очкової плямистості спричиняла підвищення лектинової активності різних клітинних фракцій і в коренях, і в листках проростків пшениці обох сортів (див. рис. 1, 2).

Лектинова активність фракції КС збільшувалася порівняно з контролем у проростків пшениці обох сортів. Максимальні значення лектинової активності у проростків сорту 'Миронівська 808' зафіксовані через 24 год ($152,17 \text{ (мкг/мл)}^{-1}$ у листках і $200,74 \text{ (мкг/мл)}^{-1}$ у коренях), а у проростків 'Renan' — через 48 год ($450,52 \text{ (мкг/мл)}^{-1}$ у листках і $302,22 \text{ (мкг/мл)}^{-1}$ у коренях). Динаміка лектинової активності фракції КС була фазною і відрізнялася в різних органах проростків пшениці дослідних сортів. У проростків сорту 'Миронівська 808' лектинова активність фракції КС у листках мала три піки: через 24, 72 і 120 год, а у коренях — два: через 24 і 96 год. У проростків 'Renan' лектинова активність фракції КС у листках і коренях мала два піки — через 48 і 120 год та через 48 і 96 год відповідно.

Лектинова активність фракції КО сильніше зростала у листках і коренях проростків сорту 'Миронівська 808' (у 1,5–3,7 раза порівняно з контролем), ніж у проростків 'Renan' (у 1,4–2,6 раза порівняно з контролем). Зміна лектинової активності фракції КО також мала фазний характер: перший пік спостерігали через 48 год (за винятком листків проростків 'Renan' з піком через 24 год), а другий — через 96 год.

На початкових етапах взаємодії рослина-живитель і патоген відбувається міжклітинне розпізнавання, в якому беруть участь лектини та лектиноподібні білки КС. У проростках 'Renan' лектинова активність, а отже опосередковано і вміст лектиноподібних білків, є більшими у фракції КС, що, ймовірно, забезпечує його вищу стійкість до патогена, ніж сорту 'Миронівська 808', у якого лектинова активність вища у фракції КО. Таким чином, захисні механізми у сприйнятливої сорту 'Миронівська 808' активувалися пізніше, вже безпосередньо в клітині, на відміну від стійкого сорту 'Renan', у якого ці механізми запускалися ще на рівні клітинної стінки. Можливо, супресори гриба пригнічували лектинову

активність фракцій КС у проростків пшениці сорту 'Миронівська 808', на відміну від 'Renan'.

Передпосівна обробка наночастинками Ag і Cu підвищувала лектинову активність у більшості варіантів, але зростання лектинової активності було меншим, ніж за інокуляції суспензією конідій збудника очкової плямистості.

За передпосівної обробки наночастинками Ag і Cu максимальна лектинова активність фракції КС у листках проростків пшениці 'Миронівська 808' була через 24 год. Одночасно вона була більшою за лектинову активність необроблених проростків. У подальшому вона знижувалася і через 120 год була нижчою, ніж у контролі.

За обробки наночастинками Ag лектинова активність фракції КС у коренях проростків пшениці 'Миронівська 808' була нижчою (24–96 год) або на рівні контролю, а за обробки наночастинками Cu — вищою, ніж у контролі, за винятком 48 год.

Максимальна лектинова активність фракції КС у листках проростків пшениці 'Renan' за обробки наночастинками Ag через 24 год була вищою за контроль, а згодом — на рівні (48 і 96 год) або нижчою (72 і 120 год) за контроль. За обробки наночастинками Cu лектинова активність фракції КС була нижчою за контроль упродовж всього експерименту.

Лектинова активність фракції КС у коренях проростків 'Renan' за дії наночастинок Ag була вищою, за винятком 96 год, а за дії наночастинок Cu — нижчою за контроль, за винятком 72 год.

Лектинова активність фракції КО у листках проростків пшениці 'Миронівська 808' за обробки наночастинками металів була вищою порівняно з контролем у 1,1–5,6 раза за використання Ag (за винятком 72 год) і у 1,2–1,7 раза за використання Cu. Зазначимо також, що через 96 год лектинова активність фракції КО за обробки наночастинками Ag була вищою у 1,5 раза, ніж за інфікування. У разі обробки наночастинками Ag спостерігали два піки лектинової активності — через 48 і 96 год, тоді як за обробки наночастинками Cu — лише один пік, через 48 год.

У коренях проростків пшениці 'Миронівська 808' лектинова активність фракції КО за обробки наночастинками Ag через 24, 48 і 96 год була нижчою за контроль, а через 72 і 120 год — вищою. У разі обробки наночастинками

Cu лектинова активність фракції КО була вищою або на рівні (48 год) контролю. За обробки наночастинками металів у коренях проростків 'Миронівська 808' спостерігали один пік (96 год) лектинової активності фракції КО.

За сумісної дії наночастинок металів і збудника очкової плямистості лектинова активність фракції КС у проростків пшениці обох сортів була вищою, ніж у неінфікованих, але оброблених проростків.

Дія Cu викликала більший ефект, ніж Ag для сорту 'Миронівська 808'. Лектинова активність фракції КС інфікованих проростків пшениці 'Миронівська 808' із необробленого насіння була вищою в 1,3–2,2 раза за дії Ag і в 1,2–2,6 раза за дії Cu, ніж за сумісного впливу. Проте, у 'Renan' лектинова активність інфікованих проростків із необробленого наночастинками насіння була вищою або на рівні лектинової активності інфікованих проростків із насіння, обробленого наночастинками Cu, у 1,4–5,9 раза.

Динаміка лектинової активності фракції КС була фазною і відрізнялася у сортів: у проростків 'Миронівська 808' піки спостерігали через 24 і 96 год, а у проростків 'Renan' — 48 і 96 год.

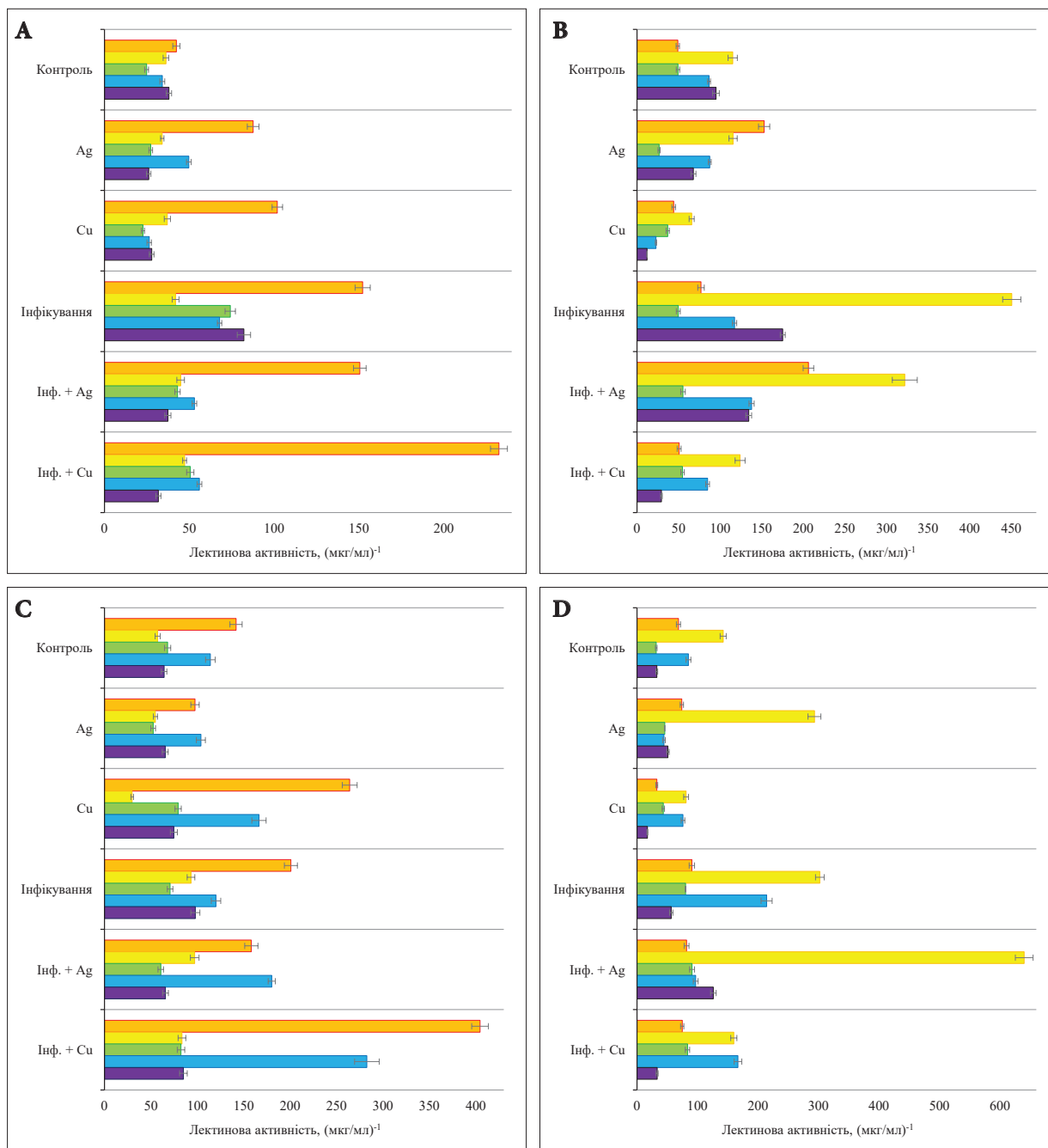
У коренях інфікованих проростків пшениці обох сортів із обробленого наночастинками насіння динаміка лектинової активності фракції КС була подібна до такої в листках.

Отже, обробка насіння наночастинками Ag і Cu сприяла підвищенню лектинової активності фракції КС проростків пшениці обох сортів. Підвищення лектинової активності може бути пов'язане з тим, що клітинна стінка є першим бар'єром, який взаємодіє з екзогенним стресором, а лектини й лектиноподібні білки клітинної стінки беруть участь у сприйнятті та передачі зовнішнього сигналу в різні компартменти клітини.

За інфікування проростків, отриманих із насіння, обробленого наночастинками металів, лектинова активність фракції КО у листках була вищою, ніж у неінфікованих проростків із обробленого наночастинками насіння у сорту 'Миронівська 808' в 1,6–2,8 раза за дії Ag і 1,1–2,3 раза за дії Cu, а у 'Renan' — в 1,4–2,9 раза за дії Ag і в 1,9–3,8 раза за дії Cu. Отже, нами було виявлено, що у листках проростків обох сортів за сумісної дії наночастинок і патогена лектинова активність фракції КО була вищою, ніж за інфікування без обробки наночастинками.

Таблиця 3. Вміст загального білка (мг/г маси сирої речовини) різних клітинних фракцій проростків озимої пшениці за інфікування *Oscillomatula yallundae* і дії наночастинок Ag та Cu
 Table 3. Total protein content (mg/g fresh weight) of various cell fractions of winter wheat seedlings infected with *Oscillomatula yallundae* and under the action of Ag and Cu nanoparticles

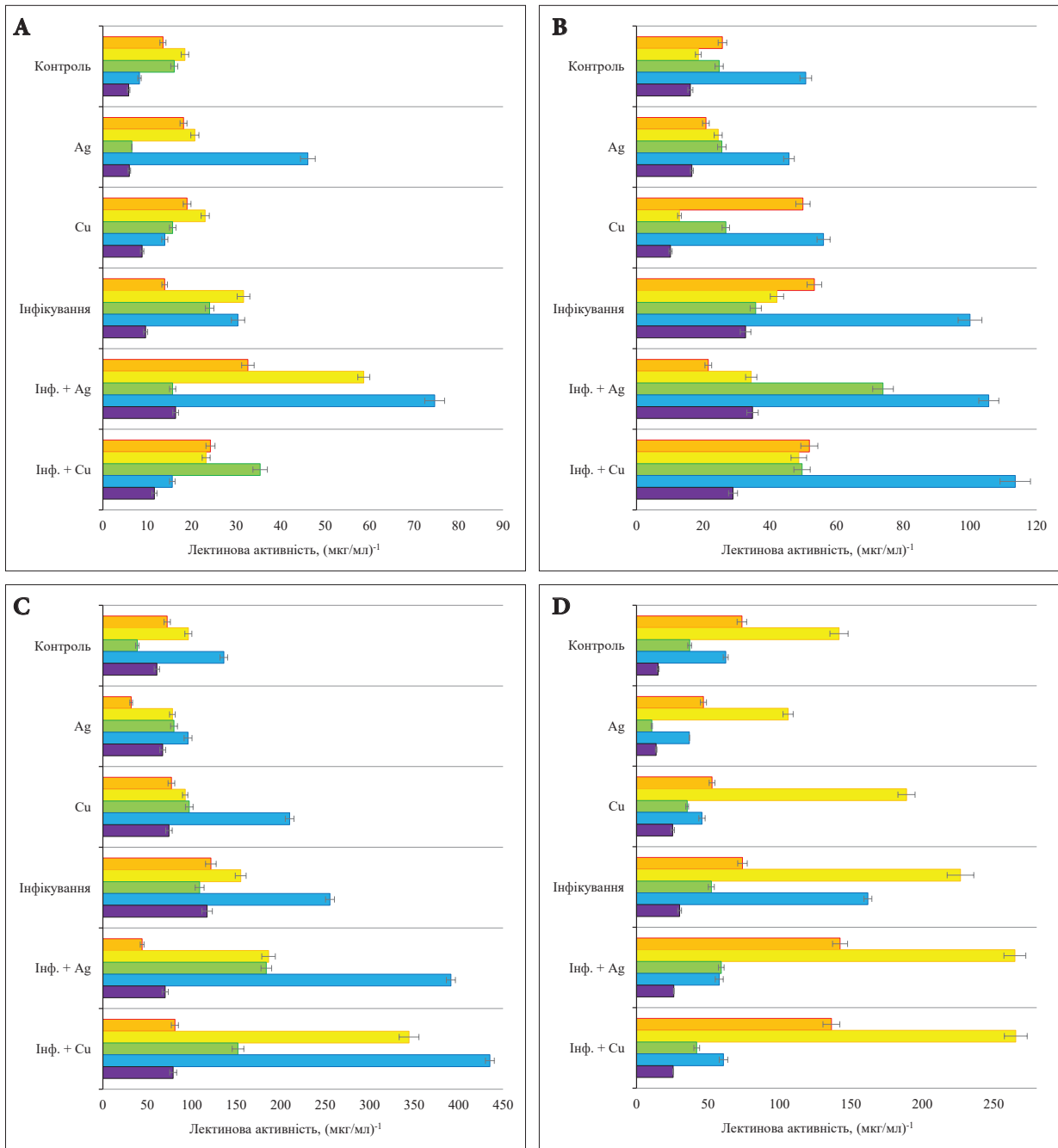
Варіант	Фракція клітинних стінок									
	Листки					Корені				
	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год
'Миронівська 808'										
К	0,38±0,017	0,44±0,015	0,32±0,012	0,23±0,010	0,21±0,009	0,28±0,008	0,28±0,008	0,23±0,006	0,11±0,004	0,08±0,003
Д	0,42±0,016 [#]	0,38±0,015 [#]	0,22±0,010 [#]	0,24±0,010 [#]	0,19±0,007 [#]	0,27±0,013	0,17±0,007 [#]	0,24±0,009 [#]	0,16±0,007 [#]	0,12±0,004 [#]
К+Ag	0,37±0,013 [#]	0,36±0,014 [#]	0,29±0,013 [#]	0,32±0,013 [#]	0,31±0,014 [#]	0,31±0,012 [#]	0,29±0,011 [#]	0,31±0,012 [#]	0,16±0,006 [#]	0,12±0,006 [#]
К+Cu	0,31±0,013 [#]	0,34±0,016 [#]	0,35±0,011 [#]	0,30±0,013 [#]	0,29±0,011 [#]	0,19±0,007 [#]	0,27±0,010 [#]	0,19±0,007 [#]	0,12±0,004 [#]	0,09±0,004 [#]
Д+Ag	0,43±0,018 [#]	0,47±0,017 [#]	0,37±0,015 [#]	0,30±0,012 [#]	0,21±0,009	0,36±0,015 [#]	0,33±0,010 [#]	0,26±0,011 [#]	0,20±0,007 [#]	0,12±0,004 [#]
Д+Cu	0,28±0,011 [#]	0,43±0,018	0,32±0,012	0,29±0,013 [#]	0,25±0,010 [#]	0,23±0,010 [#]	0,19±0,006 [#]	0,20±0,006 [#]	0,16±0,007 [#]	0,11±0,005 [#]
'Renap'										
К	0,33±0,013	0,28±0,011	0,32±0,010	0,18±0,006	0,34±0,014	0,23±0,010	0,22±0,008	0,25±0,010	0,19±0,005	0,24±0,010
Д	0,42±0,020 [#]	0,28±0,011	0,32±0,013	0,27±0,009 [#]	0,37±0,010	0,18±0,006 [#]	0,21±0,009	0,20±0,009 [#]	0,15±0,004 [#]	0,28±0,006 [#]
К+Ag	0,21±0,010 [#]	0,28±0,010	0,30±0,011 [#]	0,18±0,008	0,24±0,010 [#]	0,22±0,009	0,22±0,010	0,17±0,003 [#]	0,36±0,012 [#]	0,31±0,013 [#]
К+Cu	0,36±0,015	0,24±0,010 [#]	0,22±0,007 [#]	0,35±0,014 [#]	0,33±0,012	0,24±0,009	0,20±0,006	0,18±0,005 [#]	0,21±0,010	0,23±0,010
Д+Ag	0,16±0,006 [#]	0,20±0,007 [#]	0,29±0,010 [#]	0,23±0,010 [#]	0,24±0,009 [#]	0,20±0,007	0,20±0,006 [#]	0,18±0,007 [#]	0,33±0,012 [#]	0,25±0,011
Д+Cu	0,32±0,013	0,26±0,009 [#]	0,29±0,008	0,38±0,015 [#]	0,27±0,013 [#]	0,21±0,010 [#]	0,20±0,005	0,19±0,006 [#]	0,19±0,008	0,24±0,010
Фракція клітинних органел										
Варіант	Листки					Корені				
	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год	24 год	48 год	72 год	96 год	120 год
'Миронівська 808'										
К	0,59±0,022	0,43±0,019	0,50±0,016	0,49±0,018	0,69±0,021	0,22±0,009	0,17±0,007	0,21±0,009	0,24±0,010	0,07±0,003
Д	0,58±0,020	0,51±0,017 [#]	0,67±0,021 [#]	0,53±0,019	0,83±0,031 [#]	0,26±0,010 [#]	0,13±0,004 [#]	0,15±0,003 [#]	0,21±0,007 [#]	0,13±0,005 [#]
К+Ag	0,44±0,019 [#]	0,77±0,023 [#]	0,61±0,026 [#]	0,35±0,011 [#]	0,67±0,010	0,25±0,012	0,20±0,006 [#]	0,20±0,007	0,17±0,005 [#]	0,11±0,004 [#]
К+Cu	0,42±0,015 [#]	0,70±0,027 [#]	0,51±0,021	0,51±0,019	0,45±0,020 [#]	0,20±0,007	0,17±0,008	0,16±0,002 [#]	0,15±0,003 [#]	0,10±0,003 [#]
Д+Ag	0,49±0,022 [#]	0,55±0,020 [#]	0,51±0,019	0,43±0,016	0,49±0,017 [#]	0,18±0,008 [#]	0,17±0,003	0,16±0,004 [#]	0,17±0,006 [#]	0,12±0,005 [#]
Д+Cu	0,33±0,014 [#]	0,69±0,025 [#]	0,45±0,021 [#]	0,57±0,023 [#]	0,35±0,014 [#]	0,21±0,010	0,09±0,004 [#]	0,21±0,007	0,15±0,006 [#]	0,11±0,005 [#]
'Renap'										
К	0,31±0,014	0,43±0,018	0,32±0,011	0,32±0,009	0,50±0,020	0,22±0,008	0,11±0,003	0,22±0,010	0,13±0,006	0,27±0,010
Д	0,30±0,007	0,38±0,016	0,45±0,019 [#]	0,32±0,014	0,24±0,010 [#]	0,22±0,009	0,14±0,005 [#]	0,31±0,011 [#]	0,10±0,004 [#]	0,27±0,010
К+Ag	0,38±0,019 [#]	0,65±0,022 [#]	0,31±0,012	0,35±0,015 [#]	0,24±0,009 [#]	0,34±0,010 [#]	0,30±0,009 [#]	0,38±0,016 [#]	0,22±0,008 [#]	0,29±0,010
К+Cu	0,32±0,012	0,62±0,027 [#]	0,30±0,011 [#]	0,29±0,011	0,39±0,015 [#]	0,30±0,009 [#]	0,17±0,008 [#]	0,19±0,009 [#]	0,17±0,003 [#]	0,16±0,004 [#]
Д+Ag	0,37±0,010 [#]	0,47±0,019	0,43±0,015 [#]	0,30±0,011 [#]	0,23±0,010 [#]	0,22±0,008	0,24±0,010 [#]	0,27±0,011 [#]	0,14±0,004	0,31±0,011 [#]
Д+Cu	0,31±0,012	0,33±0,009 [#]	0,32±0,014	0,28±0,010 [#]	0,28±0,011 [#]	0,23±0,009	0,24±0,010 [#]	0,23±0,008	0,26±0,011 [#]	0,16±0,006 [#]



Час з моменту інфікування: ■ - 1 доба ■ - 2 доби ■ - 3 доби ■ - 4 доби ■ - 5 діб

Рис. 1. Лектинова активність фракції клітинних стінок проростків різних сортів *Triticum aestivum* за інфікування *Oculimacula yallundae* та дії наночастинок Ag і Cu. А: 'Миронівська 808' (надземна частина); В: 'Renan' (надземна частина); С: 'Миронівська 808' (підземна частина); D: 'Renan' (підземна частина)

Fig. 1. Lectin activity of cell walls of winter wheat seedlings infected with *Oculimacula yallundae* and under the action of Ag and Cu nanoparticles. A: 'Myronivska 808' (shoot); B: 'Renan' (shoot); C: 'Myronivska 808' (root); D: 'Renan' (root)



Час з моменту інфікування: ■ - 1 доба ■ - 2 доби ■ - 3 доби ■ - 4 доби ■ - 5 діб

Рис. 2. Лектинова активність фракції клітинних органел проростків різних сортів *Triticum aestivum* за інфікування *Oculimacula yallundae* та дії наночастинок Ag і Cu. А: 'Миронівська 808' (надземна частина); В: 'Renan' (надземна частина); С: 'Миронівська 808' (підземна частина); D: 'Renan' (підземна частина)

Fig. 2. Lectin activity of cell organelles of winter wheat seedlings infected with *Oculimacula yallundae* and under the action of Ag and Cu nanoparticles. A: 'Myronivska 808' (shoot); B: 'Renan' (shoot); C: 'Myronivska 808' (root); D: 'Renan' (root)

За інфікування проростків, отриманих із насіння обробленого наночастинками металів, лектинова активність фракції КО у коренях була на рівні або вищою, ніж у неінфікованих проростків із обробленого наночастинками насіння: у сорту 'Миронівська 808' в 1,4–4,0 раза за дії Ag і в 1,6–3,7 раза за дії Cu, а у 'Renan' — в 1,6–5,6 раза за дії Ag і в 1,2–2,6 раза за дії Cu. Максимальні значення лектинової активності фракцій КО у коренях проростків обох сортів відмічено через 48 і 96 годин.

За даними наших досліджень, динаміка лектинової активності клітинних стінок і органел суттєво відрізняються. Ці відміни характерні не тільки для різних клітинних фракцій, а й для різних частин проростків і різних сортів. Це може бути обумовлено різним функціональним значенням лектиноподібних білків залежно від клітинної та органної локалізації у проростків різних за стійкістю сортів. За результатами наших досліджень можна зробити висновок, що у системі рослина-живитель-патоген реакція-відповідь на дію збудника очкової плямистості більш яскраво виражена у проростків стійкого сорту 'Renan', ніж у сприйнятливого сорту 'Миронівська 808'.

Передпосівна обробка наночастинками Ag і Cu підвищувала лектинову активність досліджуваних клітинних фракцій інфікованих проростків пшениці обох досліджуваних сортів, але більшою мірою у сорту 'Миронівська 808'.

Висновки

Інфікування проростків пшениці різних за чутливістю сортів грибом *O. yallundae* викликало збільшення маси листків і коренів у проростків сорту 'Renan', що обумовлено продукуванням патогеном речовин, які стимулюють ріст рослини-живителя. Високі значення ІТ проростків сорту 'Renan' свідчать про швидше залучення ними лектин-залежних адаптивних процесів порівняно з проростками сорту 'Миронівська 808' для зменшення впливу *O. yallundae*. Передпосівна обробка наночастинками Ag і Cu також виявила позитивний вплив на морфометричні показники проростків обох сортів, про що свідчать значні показники ІТ. Зміни вмісту білка в обох клітинних фракціях (КС і КО) проростків різних за стійкістю сортів пшениці не виявили суттєвих відмінностей показника

за дії наночастинок металів (Ag або Cu) і збудника очкової плямистості. Реакція-відповідь проростків пшениці обох сортів на інфікування *O. yallundae* проявлялася у швидшій зміні лектинової активності фракції КС, найвищі значення якої зафіксовані через 24–48 год після зараження. У фракції КО максимальна лектинова активність за інфікування виявлена пізніше — через 48 та 96 год. За інфікування *O. yallundae* передпосівна обробка наночастинками Ag і Cu сприяла активізації захисних реакцій у проростків пшениці обох досліджуваних сортів, зокрема збільшенню лектинової активності клітинних стінок і органел. У інфікованих проростків пшениці передпосівна обробка наночастинками металів призвела до істотного підвищення лектинової активності, при цьому відмічено фракційну, органозалежну та сортоспецифічну відмінності, а в неінфікованих вплив наночастинок був неоднозначним і змінним у часі.

Отримані результати є основою для подальших досліджень, детального вивчення та використання наночастинок металів для захисту рослин як від біотичних, так і абіотичних чинників.

Подяки

Висловлюємо подяку Інституту захисту рослин НААН України за наданий для дослідження штам гриба. Висловлюємо також подяку д. техн. н. К.Г. Лопатьку, професору кафедри технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства Національного університету біоресурсів і природокористування України за люб'язно надані для експерименту колоїдні розчини наночастинок срібла та міді.

ДОТРИМАННЯ ЕТИЧНИХ НОРМ

Автори повідомляють про відсутність будь-якого конфлікту інтересів.

ORCID

Ю.М. Письменна: [ID https://orcid.org/0000-0002-0251-0683](https://orcid.org/0000-0002-0251-0683)
 О.О. Панюта: [ID https://orcid.org/0000-0001-9847-8990](https://orcid.org/0000-0001-9847-8990)
 В.Н. Белава: [ID https://orcid.org/0000-0001-7802-4166](https://orcid.org/0000-0001-7802-4166)
 О.П. Ольхович: [ID https://orcid.org/0000-0002-7314-7631](https://orcid.org/0000-0002-7314-7631)
 Н.Ю. Таран: [ID https://orcid.org/0000-0002-8669-5899](https://orcid.org/0000-0002-8669-5899)

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Al-Huqail A.A., Hatata M.M., Al-Huqail A.A., Ibrahim M.M. 2018. Preparation, characterization of silver phyto nanoparticles and their impact on growth potential of *Lupinus termis* L. seedlings. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2): 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.08.013>
- Anikeev V.V., Kutuzov F.F. 1961. A new method of determining the leaf surface in cereals. *Fiziologiya Rasteniy*, 8(3): 375–377.
- Badawy A.A., Abdelfattah N.A., Salem S.S., Awad M.F., Fouda A. 2021. Efficacy assessment of biosynthesized copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) on stored grain insects and their impacts on morphological and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. *Biology*, 10(3): 233. <https://doi.org/10.3390/biology10030233>
- Belava V.N., Panyuta O.O., Taran N.Yu. 2009. The role of lectins in the protective reactions of plants to phytopathogens. *Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*, 41(3): 221–234. [Белав В.Н., Панюта О.О., Таран Н.Ю. 2009. Роль лектинів у захисних реакціях рослин до фітопатогенів. *Фізіологія та біохімія культурних рослин*, 41(3): 221–234.]
- Belava V.N., Zeleniy S.B., Panyuta O.O., Taran N.Yu., Pogribniy P.V. 2010. Expression of lectin and defensin genes in Mironovskaya 808 and Roazon wheat cultivars infected with *Pseudocercospora herpotrichoides*. *Biopolymers and Cell*, 26(1): 45–50. <https://doi.org/10.7124/bc.000143>
- Belava V.N., Panyuta O.O., Yakovleva G.M., Pysmenna Y.M., Volkogon M.V. 2017. The effect of silver and copper nanoparticles on the wheat — *Pseudocercospora herpotrichoides* pathosystem. *Nanoscale Research Letters*, 12(1): 250. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2028-6>
- Bradford M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2): 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Chekman I.S. 2009. Nanoparticles: properties and prospects of application. *Ukrainian Biochemical Journal*, 81(1): 122–129. [Чекман І.С. 2009. Наночастинки: властивості та перспективи застосування. *Український біохімічний журнал*, 81(1): 122–129.]
- Cvjetko P., Milošić A., Domijan A.-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B. 2017. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 137: 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.009>
- Das P., Barua S., Sarkar S., Chatterjee S.K., Mukherjee S., Goswami L., Das S., Bhattacharya S., Karak N., Bhattacharya S.S. 2018. Mechanism of toxicity and transformation of silver nanoparticles: Inclusive assessment in earthworm-microbe-soil-plant system. *Geoderma*, 314: 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.008>
- Dimkpa C.O., McLean J.E., Latta D.E., Manangón E., Britt D.W., Johnson W.P., Anderson A.J. 2012. CuO and ZnO nanoparticles: phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *Journal of Nanoparticle Research*, 14: 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1125-9>
- Dos Santos C., Franco O.L. 2023. Pathogenesis-related proteins (PRs) with enzyme activity activating plant defense responses. *Plants*, 12(11): 2226. <https://doi.org/10.3390/plants12112226>
- Dzumabaev P. 1963. Eyespot of cereals. *Plant Protection*, 9: 55–56. [Джумабаєв П. 1963. Очкова плямистість злаків. *Захист рослин*, 9: 55–56.]
- Feigl G. 2023. The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: a comprehensive review. *Journal of Plant Interactions*, 18(1): 2243098. <https://doi.org/10.1080/17429145.2023.2243098>
- Ferreira R.B., Monteiro S., Freitas R., Santos C.N., Chen Z., Batista L.M., Duarte J., Borges A., Teixeira A.R. 2007. The role of plant defence proteins in fungal pathogenesis. *Molecular Plant Pathology*, 8(5): 677–700. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00419.x>
- Hoagland D.R., Arnon D.I. 1950. *The water-culture method for growing plants without soil*. California, Berkeley: University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, 32 pp.
- Hwang I.S., Hwang B.K. 2011. The pepper mannose-binding lectin gene CaMBL1 is required to regulate cell death and defense responses to microbial pathogens. *Plant Physiology*, 155(1): 447–463. <https://doi.org/10.1104/pp.110.164848>
- Kacziba B., Szierer Á., Mészáros E., Rónavári A., Kónya Z., Feigl G. 2023. Exploration the homeostasis of signaling molecules in monocotyledonous crops with different CuO nanoparticle tolerance. *Plant Stress*, 7: 100145. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100145>
- Kim N.H., Lee D.H., Choi D.S., Hwang B.K. 2015. The pepper GNA-related lectin and PAN domain protein gene, CaGLP1, is required for plant cell death and defense signaling during bacterial infection. *Plant Science*, 241: 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.07.003>
- Konozy E.H.E., Osman M.E.M., Dirar A.I., Ghartey-Kwansah G. 2022. Plant lectins: A new antimicrobial frontier. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 155: 113735. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113735>
- Kravchenko N.O., Kopylov E.P., Golovach O.V., Dmytruk O.M. 2014. Assessment of pathogenicity of the soil fungus *Trichoderma viride* 505. *Agricultural Microbiology*, 20: 23–28. [Кравченко Н. О., Копилов Є. П., Головач О. В., Дмитрук О. М. 2014. Оцінка патогенності ґрунтового гриба *Trichoderma viride* 505. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 20: 23–28.] <https://doi.org/10.35868/1997-3004.20.23-28>
- Kryuchkova L.O. 2007. *Diseases of winter wheat caused by necrotrophic fungal pathogens and methods for their diagnostics*: Dr. Sci. Diss. Abstract. Kyiv, National Agrarian University, 50 pp. [Крючкова Л.О. 2007. *Хвороби озимої пшениці*,

- які спричиняються некротрофними грибними патогенами, та методи їх діагностики. Автореф. дис. док. біол. наук: 06.01.11 — "Фітопатологія". Київ, Національний аграрний університет, 50 с.]
- Kryuchkova L.O. 2013. Micromycetes associated with wheat diseases in different regions of Ukraine. *Microbiological Journal*, 75(4): 59–68. [Крючкова Л.О. 2013. Мікроміцети з ураженої хворобами пшениці у різних регіонах України. *Мікробіологічний журнал*, 75(4): 59–68.]
- Lacko-Bartosova M., Korczyk-Szabo J., Razny R. 2010. *Triticum spelta* — a specialty grain for ecological farming systems. *Research Journal of Agricultural Science*, 42(1): 143–147.
- Liatukas Ž., Ruzgas V. 2008. Resistance of Lithuanian winter wheat breeding material to eyespot. *Zemdirbyste-Agriculture*, 95(3): 336–343.
- Lopatko K.H. 2012. The use of biological properties of metal nanoparticles in the cultivation of cereals. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Technology and energy of agricultural industry*, 170(1): 193–203. [Лопатко К.Г. 2012. Використання біологічних властивостей наночастинок металів, при вирощуванні зернових. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, 170(1): 193–203.]
- Lopatko K.H., Aftandilants E.H., Kalenska S.M., Tonkha O.L. 2009. *Method for obtaining a non-ionic colloidal solution of metals*. Patent for invention 38459 of 12.01.09. [Лопатко К.Г., Афтанділянц Є.Г., Каленська С.М., Тонха О.Л. 2009. *Спосіб отримання неіонного колоїдного розчину металів*. Патент на винахід № 38459 від 12.01.09.]
- López-Vargas E.R., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., De Alba Romenus K., Cabrera de la Fuente M., Benavides-Mendoza A., Juárez-Maldonado A. 2018. Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences*, 8(7): 1020. <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Mamenko P.M. 2014. Functions of plant lectins under abiotic and biotic stresses. *Plant Physiology and Genetics*, 46(2): 95–107.
- Mansoor S., Zahoor I., Baba T.R., Padder S.A., Bhat Z.A., Koul A.M., Jiang L. 2021. Fabrication of silver nanoparticles against fungal pathogens. *Frontiers in Nanotechnology*, 3: 679358. <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.679358>
- Masarovičová E., Kráľová K. 2013. Metal nanoparticles and plants/ Nanocząstki metaliczne i rośliny. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 20(1): 9–22. <https://doi.org/10.2478/eces-2013-0001>
- Matras E., Gorczyca A., Pocięcha E., Przemieniecki S.W., Oćwieja M. 2022. Phytotoxicity of silver nanoparticles with different surface properties on monocots and dicots model plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22: 1647–1664. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00760-9>
- Moradi A., El-Shetehy M., Gamir J., Austerlitz T., Dahlin P., Wiczorek K., Künzler M., Mauch F. 2021. Expression of a fungal lectin in *Arabidopsis* enhances plant growth and resistance toward microbial pathogens and a plant-parasitic nematode. *Frontiers in Plant Science*, 12: 657451. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.657451>
- Panyuta O.O., Belava V.N., Olkhovych O.P., Taran N.Yu. 2018. Effect of phosphate-mobilized microbial preparations on lectin activity and photosynthetic apparatus of winter wheat seedlings under eyespot causal agent infection. *Microbiological Journal*, 80(6): 66–78. [Панюта О.О., Белавя В.Н., Ольхович О.П., Таран Н.Ю. 2018. Вплив фосфатмобілізуювальних мікробних препаратів на лектинову активність і фотосинтетичний апарат проростків пшениці озимої за інфікування збудником церкоспорельозу. *Мікробіологічний журнал*, 80(6): 66–78.] <https://doi.org/10.15407/microbiolj80.06.066>
- Panyuta O., Belava V., Fomaidi S., Kalinichenko O., Volkogon M., Taran N. 2016. The effect of pre-sowing seed treatment with metal nanoparticles on the formation of the defensive reaction of wheat seedlings infected with the eyespot causal agent. *Nanoscale Research Letters*, 11(1): 1–5. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1305-0>
- Pittol M., Tomacheski D., Simões D.N., Ribeiro V.F., Santana R.M.C. 2017. Macroscopic effects of silver nanoparticles and titaniumdioxide on edible plant growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 8: 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2017.07.003>
- Pogorila N.F., Surzhyk L.M., Pogorila Z.O. 2002. A new way of testing plant lectins. *Ukrainian Botanical Journal*, 59(2): 217–220. [Погоріла Н.Ф., Суржик Л.М., Погоріла З.О. 2002. Новий спосіб тестування лектинів рослин. *Український ботанічний журнал*, 59(2): 217–220.]
- Pusztahelyi T. 2018. Chitin and chitin-related compounds in plant–fungal interactions. *Mycology*, 9: 189–201. <https://doi.org/10.1080/21501203.2018.1473299>
- Pysmenna Yu.M., Panyuta O.O., Belava V.N., Taran N.Yu. 2014. Lectin activity of cell walls and cell organelles of winter wheat (*Triticum aestivum*) seedlings under biotic stress. *Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University. Biology Series*, 23(1129): 65–72. [Письменна Ю.М., Панюта О.О., Белавя В.Н., Таран Н.Ю. 2014. Лектинова активність клітинних стінок і клітинних органел проростків озимої пшениці (*Triticum aestivum*) за біотичного стресу. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія "Біологія"*, 23(1129): 65–72.]
- Qiu R., Wei S., Zhang M., Li H., Sun H., Liu G., Li M. 2018. Sensors for measuring plant phenotyping: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2): 1–17. <https://doi.org/10.25165/ij.ijabe.20181102.2696>
- Raikhel N.V., Mishkind M.L., Palevitz B.A. 1984. Characterization of a wheat germ agglutinin-like lectin from adult wheat plants. *Planta*, 162(1): 55–61. <https://doi.org/10.1007/BF00397421>
- Rizwan M., Ali S., Qayyum M.F., Ok Y.S., Adrees M., Ibrahim M., Rehman Z.U., Farid M., Abbas F. 2017. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 322: 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.061>

- Rudiger H., Gabius H.-J. 2001. Plant lectins: Occurrence, biochemistry, functions and applications. *Glycoconjugate Journal*, 18: 589–613. <https://doi.org/10.1023/a:1020687518999>
- Taran N., Batsmanova L., Kosyk O., Smirnov O., Kovalenko M., Honchar L., Okanencko A. 2016. Colloidal nanomolybdenum influence upon the antioxidative reaction of chickpea plants (*Cicer arietinum* L.). *Nanoscale Research Letters*, 11(1): 476. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1690-4>
- Tortella G., Rubilar O., Fincheira P., Parada J., de Oliveira H.C., Benavides-Mendoza A., Leiva S., Fernandez-Baldo M., Seabra A.B. 2024. Copper nanoparticles as a potential emerging pollutant: Divergent effects in the agriculture, risk-benefit balance and integrated strategies for its use. *Emerging Contaminants*, 10(4): 100352. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100352>
- Vusatyy R.O. 2005. *Virulence of Pseudocercospora herpotrichoides (Fron.) Deighton and development of donors creating methods of winter wheat resistance against eyespot pathogen*. Cand. Sci. Diss. Abstract. Kharkiv, Kharkiv National Agrarian University named after V.V. Dokuchaev, 24 pp. [Вусатий Р.О. 2005. Вірулентність *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron.) Deighton та розробка методів створення донорів стійкості озимої пшениці до збудника очкової плямистості. Автореф. дис. канд. с/г наук: 06.01.11 — "Фітопатологія", Харків, Харківський національний аграрний університет імені В.В. Докучаєва, 24 с.]
- Wilkins D.A. 1978. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root length. *New Phytologist*, 80: 623–633. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04685.x>
- Yasmeen F., Raja N.I., Ilyas N., Komatsu S. 2018. Quantitative proteomic analysis of shoot in stress tolerant wheat varieties on copper nanoparticle exposure. *Plant Molecular Biology Reporter*, 36: 326–340. <https://doi.org/10.1007/s11105-018-1082-2>

Effect of pre-sowing treatment with silver and copper nanoparticles on the lectin dependent adaptive reactions of *Triticum aestivum* (Poaceae) to the eyespot causal agent *Oculimacula yallundae* (Helotiales, Ascomycota)

Yu.M. PYSMENNA, O.O. PANYUTA, V.N. BELAVA,
O.P. OLKHOVYCH, N.Yu. TARAN
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Educational and Scientific Centre "Institute of Biology and Medicine",
64/13 Volodymyrska Str., Kyiv 01601, Ukraine

Abstract. Morphometric parameters and lectin activity of seedlings of soft winter wheat (*Triticum aestivum*) inoculated with conidial suspension of *Oculimacula yallundae*, an eyespot causal agent, were studied under conditions of pre-sowing treatment with silver and copper nanoparticles. The study revealed that the seed treatment of two wheat cultivars of different resistance (a susceptible 'Myronivska 808' and a relatively resistant 'Renan') affects the seedling growth of both cultivars as well as protein content and lectin activity of various cellular fractions. It has been found that the lectin activity of cell wall fractions and cell organelles in wheat seedlings at the infection and pre-sowing treatment is higher than in uninfected seedlings. The dynamics of lectin activity of various cell fractions during infection differed. The reaction-response effect was more pronounced in seedlings of the 'Renan' cultivar relatively resistant to the pathogen. Pre-sowing treatment with Ag and Cu nanoparticles induced lectin-dependent defense responses in wheat seedlings of both studied cultivars. The obtained results hold potential for further research and use of metal nanoparticles for plant protection against biotic and abiotic factors.

Keywords: lectin activity, morphometry, nanoparticles, pathogen, protein, *Pseudocercospora herpotrichoides*, tolerance index, winter wheat