

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК І НАНОТЕХНОЛОГІЙ У КАРТОПЛЯРСТВІ

А.В. Васильченко¹, С.В. Дерев'янку²

²кандидат біологічних наук

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН

вул. Шевченка, 97, м. Чернігів, 14027, Україна

e-mail: ¹top.leader.number.1@gmail.com, ²biopreparat@i.ua

ORCID: ¹0000-0003-2263-8702, ²0000-0002-9409-2473

Надійшла 10.08.2022

Мета. Проаналізувати літературу та результати власних досліджень щодо використання наночастинок і нанотехнологій у картоплярстві, а також результати сумісного застосування наночастинок та мікробних препаратів. **Методи.** Аналіз літератури, вірусологічні, мікробіологічні, інструментальні, польового дослідження, біохімічні, статистичні та економічного аналізу. **Результати.** В умовах *in vitro* визначено наночастинок з віруліцидною, бактерицидною та фунгіцидною активністю, а також такі, що стимулюють ріст бактерій. Так, наночастинок Ті, композиція наночастинок Se+I та отриманий способом нанотехнологій препарат «Аватар-2 захист» мали віруліцидну активність щодо фітопатогенного вірусу Potato virus Y в умовах вегетаційних дослідів. Методом трансмісійної електронної мікроскопії встановлено, що наночастинок Ті можуть зосереджуватись навколо віріонів вірусу Potato virus Y та адсорбуватися на їхній поверхні, це може бути потенційним поясненням їхньої віруліцидної активності. Наночастинок Zn проявляють бактерицидну активність щодо штамів корисних ґрунтових бактерій *Bacillus subtilis* IMB B-7023 і *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* IKM B-306 (2687) та штаму бактерій, патогенних для картоплі, — *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* Ac-1995, знижуючи їх титр на 100%. Композиція наночастинок Se+I тією чи іншою мірою підвищує титр усіх досліджуваних штамів корисних ґрунтових і фітопатогенних бактерій, зокрема штаму *Bacillus subtilis* IMB B-7023, що є одним із біоагентів мікробного препарату «Азогран», на 8,46–20,36%. Також композиція наночастинок Se+I виявляла найсильнішу антифунгальну активність, знижуючи діаметр колоній штамів фітопатогенних грибів *Fusarium* sp. 072 на 25,26–51,75%, *Acremonium cucurbitacearum* 502 — на 78,95–94,22 та *Acremonium strictum* 048 — на 52,67–75,00%, а також кількість колоній штаму *Acremonium cucurbitacearum* 502 — на 60,00–86,67%. Ці властивості наночастинок, їхніх композицій та препарату «Аватар-2 захист» перевірено в умовах польового дослідження, а також досліджено сумісне застосування наночастинок з мікробним препаратом «Азогран». Препарат «Аватар-2 захист» був ефективним проти вірусних, бактеріальних і грибних хвороб. Поєднання препарату «Азогран» з композицією наночастинок Se+I виявилось найкращим, знижуючи частоту встановлення бактеріальних і грибних хвороб та ступінь ураження ними, збільшуючи товарність бульб, урожайність і поліпшуючи інші показники. У цьому варіанті найбільша розрахункова рентабельність, значення якої на двох ділянках становило 111,7 і 75,8%,

що більше, ніж на контролі на 57,7 та 41,5% відповідно. Серед інших варіантів варто виділити композицію наночастинок Se+I і препарат «Азогран», проте їхні ефекти кожного окремо були меншими, ніж у поєднанні. **Висновки.** Доведено ефективність композиції наночастинок Se+I, препаратів «Аватар-2 захист» і «Азогран» для контролю інфекційних хвороб картоплі та перспективність їхнього застосування у технології вирощування картоплі. Показано позитивний вплив композиції наночастинок Se+I і препарату «Азогран» на товарність бульб та урожайність. Установлено синергію між композицією наночастинок Se+I і препаратом «Азогран». Найбільшу перспективу має сумісне застосування наночастинок і мікробних препаратів у технології вирощування картоплі.

Ключові слова: антивірусні, антибактеріальні, антифунгальні речовини, інфекційні хвороби картоплі, мікробні препарати.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202209-05>

Картопля вважається найважливішою незерною культурою у світі [1] та має велике значення і в нашій країні. Україна є одним зі світових лідерів у виробництві картоплі, посідаючи 4-те місце за валовим збором продукції та посівною площею цієї культури [2].

Незважаючи на велике значення в Україні та світі, виробництво картоплі зазнає впливу негативних чинників, що позначається на його ефективності. Однією з важливих проблем галузі є інфекційні хвороби картоплі вірусної, бактеріальної та грибнової етіологій. Так, вірус *Potato virus Y* (PVY) може спричинити втрати урожаю до 80% [3], а його некротичні штами PVY^N — до 100% [4]. Бактерія *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* завдає збитків близько 30 млн євро щороку [5]. Втрати урожаю, спричинені грибом *Alternaria solani*, варіюють від 2 до 58% у різних країнах [6]. Є також велика кількість інших мікроорганізмів — збудників хвороб картоплі, що призводять до зниження врожаю та погіршення якості продукції.

Традиційні рішення щодо боротьби з бактеріальними та грибними хворобами мають багато недоліків. Хімічні речовини, що використовуються для боротьби з цими хворобами, формують розвиток резистентності мікроорганізмів [7–9], є токсичними для людини [10, 11], тварин [12, 13] та власне сільськогосподарських культур [14, 15]. Щодо вірусних хвороб, то проти них немає

специфічних антивірусних препаратів і їхній контроль зводиться до селекції резистентних сортів, контролю якості насіння, боротьби з векторами передачі та ін. [3].

З огляду на це велику зацікавленість зумовлюють різноманітні наноматеріали, зокрема наночастинки (НЧ) металів, неметалів, оксидів металів, металоїдів і композицій НЧ різних речовин. Адже відомо, що можлива резистентність бактерій та грибів до НЧ легко долається [16], НЧ мають низьку токсичність [17, 18], за правильного використання безпечні для ґрунту [19] та навіть позитивно впливають на ґрунтову мікробіоту [20].

Привертає увагу також сумісне застосування НЧ і мікробних препаратів, адже відомо, що біопрепарати ефективні для контролю інфекційних хвороб рослин [21], а їхнє застосування сумісно з НЧ є багатообіцяючим [22], проте недостатньо вивченим.

Мета досліджень — проаналізувати літературу та результати власних досліджень щодо використання НЧ і нанотехнологій у картоплярстві, а також результати сумісного застосування НЧ та мікробних препаратів.

Матеріали та методи досліджень. У досліджах використано НЧ Zn, НЧ Ti, композицію НЧ Se+I та НЧ Zn+Ti+Se+I й отриманий способом нанотехнологій багатокомпонентний мікроелементний препарат «Аватар-2 захист», розроблені В.Г. Каплуненком та люб'язно надані В.А. Дімчевим (ТОВ «Нау-

ково-виробнича компанія «Аватар»), мікробний препарат «Азогран», розроблений та люб'язно наданий І.К. Курдишем (Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України), за що автори висловлюють щире вдячність.

Діючими речовинами препарату «Аватар-2 захист» є іони хімічних елементів: S, Cu, I, Al, Ni, Bi та V, що отримані за допомогою нанотехнологій та містяться в органічних сполуках з лимонною кислотою. Також до складу препарату входять елементи: Mg, Zn, Fe, Mn, Co, Mo, La, Ti, Se, Ge, Si, B та Ce. Препарат зареєстрований в Україні (дата реєстрації 25.05.2020, реєстраційне посвідчення № A08114, кінцева дата реєстрації 31.12.2029) та має сертифікат ТОВ «Органік Стандарт».

Колоїдні системи НЧ Zn, НЧ Ti та композиції НЧ Se+I містять НЧ відповідних елементів у дисперсній фазі та 1,5–2,5%-й розчин лимонної кислоти як дисперсійне середовище. Композицію НЧ Zn+Ti+Se+I отримано змішуванням колоїдних систем НЧ Zn, НЧ Ti та композиції НЧ Se+I.

Біоагентами мікробного препарату «Азогран» є селекціоновані штами азотофіксуювальних бактерій *Azotobacter vinelandii* IMB B-7076 і фосфатмобілізувальних бактерій *Bacillus subtilis* IMB B-7023. Препарат зареєстровано в Україні та має сертифікат ТОВ «Органік Стандарт».

У досліджах використано штами фітопатогенних вірусів, бактерій та грибів, а також штами корисних ґрунтових бактерій. Некротичний штам вірусу PVY та антисироватки для проведення серологічних досліджень були люб'язно надані О.О. Дмитрук (Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН).

Штами фітопатогенних бактерій *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* B-1084T та *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* Ac-1995 отримано з депозитарію Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України.

Штами фітопатогенних грибів *Fusarium* sp. 072, *Acremonium cucurbitacearum* 502 та *Acremonium strictum* 048 були люб'язно надані О.В. Надкерничною та Є.П. Копиловим (Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН).

Штами корисних ґрунтових бактерій *Bacillus subtilis* IMB B-7023, що є біоагентом мікробного препарату «Азогран», та *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* IKM B-306 (2687), що є біоагентом мікробного препарату «Гаупсин», отримані з депозитарію Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України.

Для виявлення НЧ, що найактивніші проти патогенів, проводили дослідження *in vitro*.

Антивірусну активність *in vitro* вивчали у вегетаційних дослідях, що закладалися згідно з відповідними методиками [23]. За наявності або відсутності симптомів інфекції у рослин-індикаторів спостерігали візуально, наявність вірусу у тканинах рослин перевіряли методом крапельної аглютинації [24] та трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ).

Антибактеріальну активність НЧ *in vitro* вивчали, вирощуючи культури бактерій у рідкому поживному середовищі з додаванням НЧ і без НЧ [25]. Чисельність колонієутворювальних одиниць у 1 см³ рідких культур (КУО/см³) визначали методом розведення на тверде поживне середовище [26] або спектрофотометрично за оптичною густиною.

Антифунгальну активність НЧ щодо фітопатогенних грибів досліджували, висіваючи культури грибів у тверде поживне середовище з додаванням НЧ методом уколу. Середовище без НЧ використовували як контроль. Ефективність НЧ визначали за кількістю та діаметром колоній на контролі та у дослідних варіантах [27].

Для вивчення впливу НЧ на мікробіоту ризосферного ґрунту картоплі та ураження рослин інфекційними хворобами *in vivo* було закладено 2 дрібноділянкові досліді: на дерново-підзолистому ґрунті та на чорноземі типовому вилугуваному. Досліді проводили у 2019–2021 рр. згідно із загальноприйнятими методиками [28]. Ділянки знаходилися на землях Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН у Чернігівській обл. на території Полісся. Координати ділянки з дерново-підзолистим ґрунтом — 51°31'29.7" N 31°21'28, 2" E у 2019–2020 рр. та 51°31'30, 8" N 31°21'22, 3" E

у 2021 р. Координати ділянки з чорноземом типовим вилугуваним — 51°33'50, 0" N 31°20'12, 0" E у 2019 р., 51°33'47, 6" N 31°20'20, 9" E у 2020 р. та 51°33'50, 8" N 31°20'16, 4" E у 2021 р. Для досліджень обрано сорт картоплі Сувенір чернігівський. НЧ і препарати застосовували способом передпосівної обробки. Визначено концентрації та навантаження НЧ і препаратів, застосовуваних у дослідах (табл. 1).

Для дослідження впливу НЧ на мікробіоту ризосфери рослин картоплі готували ґрунтові суспензії за загальноприйнятими методиками [26] та висівали їх на відповідні агаризовані поживні середовища для підрахунку чисельності КУО/см³ різних груп мікроорганізмів. Визначали загальну чисельність ґрунтових мікроорганізмів, чисельність діазотрофів, фосфатмобілізуювальних мікроорганізмів (здатних солюбілізувати фосфор з ферум фосфату, алюміній фосфату та кальцій фосфату).

Вплив НЧ і препаратів на ураження рослин картоплі бактеріальними та грибовими хворобами *in vivo* досліджували на прикладі парші звичайної та сухої гнилі. Визначали частоту виявлення цих хвороб і ступінь ураження ними рослин картоплі [29].

Вплив НЧ і препаратів на ураження рослин картоплі вірусними хворобами *in vivo*

досліджували на прикладі вірусів *Potato virus X (PVX)*, *Potato virus M (PVM)*, *Potato virus S (PVS)* та PVY, визначаючи частоту їх виявлення [29].

Для вивчення впливу НЧ і препаратів на якість продукції за ураження інфекційними хворобами визначали товарність бульб картоплі та врожайність у варіантах [30], уміст крохмалю в бульбах [31].

Для дослідження впливу НЧ на фізіологічний стан рослин картоплі за ураження інфекційними хворобами визначали вміст хлорофілу [32], рибонуклеазну [33] та пероксидазну [34] активність у тканинах листків картоплі.

Статистичний аналіз даних проводили за загальноприйнятими методиками [35]. Підготовку даних до аналізу здійснювали у програмі Microsoft Office Excel, статистичний аналіз — у програмі StatSoft STATISTICA.

Для визначення економічної ефективності застосування НЧ і препаратів використовували традиційні підходи порівняння результату від певного агроприйому з витратами на його проведення. Аналіз проводили за середніми 3-річними даними. Під час моделювання витратної частини технологічні операції та витрати ресурсів прийнято за нормативами ННЦ «Інститут

1. Концентрації та навантаження наночастинок, композицій, препаратів та їх поєднань, що застосовувалися для передпосівної обробки насіння картоплі у 2019–2021 рр.

Варіант	Навантаження, л/т	Концентрація розчину/препарату	Концентрація (на 1 бульбу)
Контроль (проточна вода)	1	—	—
НЧ Zn	1	4000 мг/л	97,6 мкг
НЧ Ti	1	500 мг/л	12,2 мкг
Композиція НЧ Se+I	1	100+150 мг/л	2,4+3,7 мкг
Композиція НЧ Zn+Ti+Se+I	1	НЧ Zn: 4000 мг/л НЧ Ti: 500 мг/л НЧ Se+I: 100+150 мг/л	НЧ Zn: 97,6 мкг НЧ Ti: 12,2 мкг НЧ Se+I: 2,4+3,7 мкг
Препарат «Аватар-2 захист»	1	—	2,44 мкл
Препарат «Азогран»	1	B. subtilis: 1·10 ⁹ КУО/см ³ A. vinelandii: 1·10 ⁸ КУО/см ³	B. subtilis: 2,4·10 ⁷ КУО/см ³ A. vinelandii: 2,4·10 ⁶ КУО/см ³
Препарат «Азогран» + композиція НЧ Se+I	1	B. subtilis: 1·10 ⁹ КУО/см ³ A. vinelandii: 1·10 ⁸ КУО/см ³ Se+I: 100+150 мг/л	B. subtilis: 2,7·10 ⁷ КУО/см ³ A. vinelandii: 2,4·10 ⁶ КУО/см ³ Se+I: 2,4+3,7 мкг

аграрної економіки НААН» [36, 37] з відповідним коригуванням операцій та включенням додаткових прямих і накладних витрат.

Результати досліджень. У дослідженнях *in vitro* нами визначено НЧ, що мають антивірусну, антибактеріальну та антифунгальну активність. Виявлено також, що деякі НЧ стимулюють ріст бактерій. Так, за результатами вегетаційних дослідів установлено, що НЧ Ті, препарат «Аватар-2 захист» і композиція НЧ Se+I мають віруліцидну активність щодо вірусу PVY в умовах *in vitro*, що частково наведено у наших попередніх роботах [38]. Рослини-індикатори, що інокулювалися вірусом суспензією, яка попередньо інкубувалася з відповідними НЧ і препаратами, залишалися безсимптомними впродовж усього терміну спостереження (28 днів).

Методом трансмісійної електронної мікроскопії установлено, що НЧ Ті можуть взаємодіяти з віріонами PVY, зосереджуючись навколо них та адсорбуючись на їхній поверхні (рис. 1).

Адсорбція НЧ Ті на поверхні віріонів PVY може бути потенційним поясненням їхньої віруліцидної активності у вегетаційних дослідях, адже з літератури відомо, що адсорбція НЧ металів на поверхні віріонів та їх безпосередня взаємодія з білками та глікопротеїнами вірусів може бути одним з механізмів їхньої антивірусної активності [39, 40]. Адсорбція НЧ на віріонах може змінювати їхню геометрію, а взаємодія НЧ з капсидними білками — змінювати їхню просторову конформацію або призводити до руйнування [40].

Установлено, що НЧ Zn мають сильну бактерицидну активність щодо двох

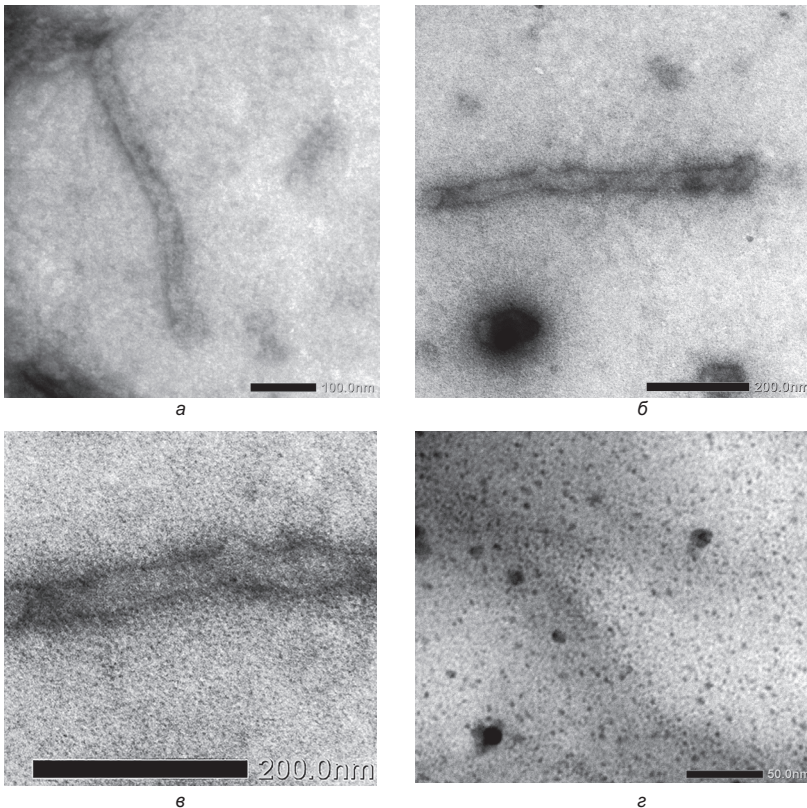


Рис. 1. Взаємодія віріонів Potato virus Y з наночастинками Ti: а — нативний віріон; б — після взаємодії з наночастинками Ti; в — збільшений фрагмент мікрофотографії б, на якому видно наночастинки, що зосереджені навколо віріону та адсорбовані на його поверхні; г — наночастинки Ti

досліджуваних виробничих штамів корисних ґрунтових бактерій (*Bacillus subtilis* IMB B-7023 та *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* ICM B-306 (2687)) та одного з двох досліджуваних штамів бактерій, патогенних для картоплі (*Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* Ac-1995), в умовах *in vitro*, знижуючи їхній титр на 100% (рис. 2).

Виявлено, що інша композиція НЧ (Se+I) тією чи іншою мірою підвищувала титр усіх досліджуваних штамів корисних ґрунтових та фітопатогенних бактерій (див. рис. 2). Зокрема, композиція НЧ Se+I підвищувала чисельність КУО/см³ *Bacillus subtilis* IMB B-7023, що є одним із біоагентів мікробного препарату «Азогран», на 8,46–20,36% (див. рис. 2), що частково наведено у наших публікаціях [25].

За результатами дослідження впливу НЧ та препарату «Аватар-2 захист» на фітопатогенні гриби встановлено, що найсильнішу антифунгальну активність має композиція НЧ Se+I, зменшуючи діаметр колоній штамів *Fusarium* sp. 072 (на 25,26–51,75%), *Acremonium cucurbitacearum* 502 (на 78,95–94,22%) та *Acremonium strictum* 048 (на 52,67–75,00%), а також знижуючи кількість колоній штаму *Acremonium cucurbitacearum* 502 на 60,00–86,67%, тобто, призводячи до загибелі міцелію [27].

Досліджено активність НЧ, препаратів «Аватар-2 захист» та «Азогран» і поєднання композиції НЧ Se+I з препаратом «Азогран» в умовах *in vivo*. За даними 2019–2021 рр. встановлено, що серед усіх досліджених варіантів поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I найбільше сприяє підвищенню чисельності мікроорганізмів, що розчиняють ферум фосфат (на 14,1–66,7%), алюміній фосфат (на 45,6–57,9) та кальцій фосфат (на 18,4–34,1%) на обох типах ґрунтів — дерново-підзолистому та чорноземі типовому вилугуваному.

Статистично значуще зниження частоти виявлення бактеріальних хвороб на чорноземі типовому вилугуваному виявлено за впливу композиції НЧ Se+I, препарату «Аватар-2 захист» та поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I, грибних хвороб — за впливу НЧ Zn, НЧ Ti, композиції НЧ Se+I, композиції НЧ Zn+Ti+Se+I та поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I (див. рис. 3, а).

В усіх досліджуваних варіантах достовірно знижувався ступінь ураження бактеріальними хворобами. Ступінь ураження грибними хворобами значно знижувався за впливу НЧ Zn, препаратів «Аватар-2 захист», «Азогран» та поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I.

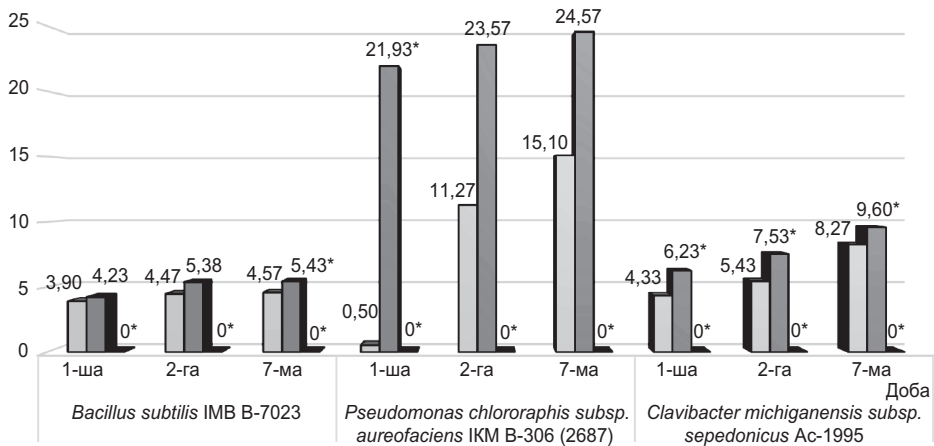
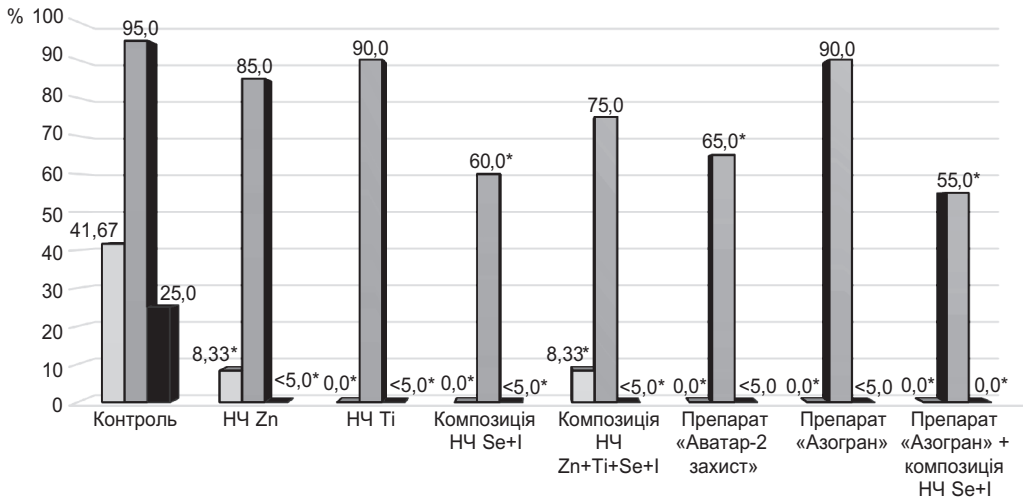
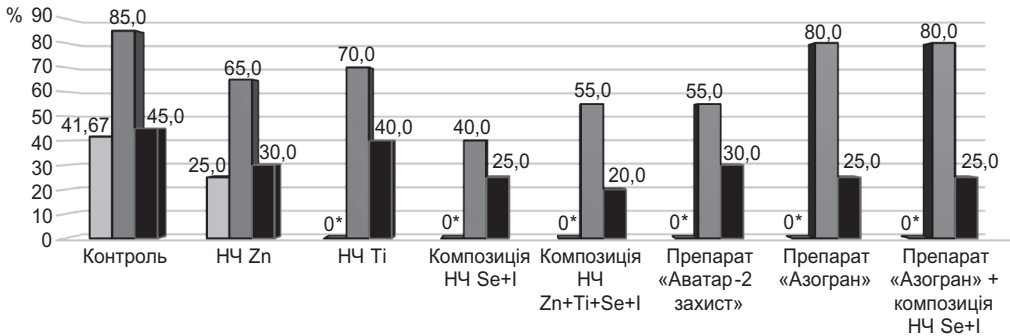


Рис. 2. Кількість КУО/см³ штамів *Bacillus subtilis* IMB B-7023, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* ICM B-306 (2687) та *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* Ac-1995 за впливу НЧ, $\times 10^8$ КУО/см³: □ — контроль; ■ — композиція НЧ Se+I; ■ — НЧ Zn. Знак * означає статистично значущі відмінності щодо контролю згідно з тестом Fishers's least significant difference test за рівня значущості $P < 0,05$



а



б

Рис. 3. Частота виявлення вірусу *Potato virus X*, парші звичайної та сухої гнилі за впливу НЧ і препаратів, %: а — на чорноземі типовому вилугуваному; б — на дерново-підзолистому ґрунті; □ — середня частота виявлення вірусу *Potato virus X*; ■ — середня частота виявлення парші звичайної; ■ — середня частота виявлення сухої гнилі. Знак * вказує на значущу різницю щодо контролю за рівня значущості $P < 0,05$ згідно з U-критерієм Мана-Уїтні

Серед вірусних хвороб найбільше досліджували НЧ та препарати впливали на частоту виявлення вірусу PVX, яка достовірно знижувалася в усіх варіантах (див. рис. 3). Препарат «Аватар-2 захист» та поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I також значно знижували частоту виявлення вірусу PVS, тобто на чорноземі типовому вилугуваному ці варіанти були найефективнішими щодо зниження ураження вірусними хворобами [29].

На дерново-підзолистому ґрунті досліджували НЧ та препарати дещо знижували частоту виявлення бактеріальних і грибних

хвороб, проте без достатнього рівня статистичної значущості (рис. 3, б).

Ступінь ураження бактеріальними хворобами достовірно знижувався за впливу НЧ Zn композиції НЧ Se+I та композиції НЧ Zn+Ti+Se+I, ступінь ураження грибними хворобами — за впливу композиції НЧ Se+I, препарату «Азогран» та поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I (рис. 3, б) [29].

На дерново-підзолистому ґрунті НЧ і препарати також найістотніше впливали на частоту виявлення вірусу PVX (див. рис. 3, б). Найкращим варіантом виявився

препарат «Аватар-2 захист», що значно знижував частоту виявлення вірусів PVX, PVM, PVS та PVY [29].

Отже, найкращим варіантом було поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I. Це поєднання найсильніше впливало на ураження бактеріальними та грибними хворобами, достовірно знижуючи ступінь ураження грибними хворобами на дерново-підзолистому ґрунті, і як ступінь ураження, так і частоту виявлення бактеріальних та грибних хвороб на чорноземі типовому вилугуваному. Також це поєднання значно знижувало частоту виявлення вірусів PVX і PVS [29]. Поєднання мікробних препаратів з НЧ є найперспективнішим для боротьби з інфекційними хворобами картоплі.

За результатами дослідження впливу НЧ і препаратів на фізіологічні показники рослин картоплі встановлено, що НЧ Zn, композиція НЧ Se+I та поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I значно підвищують уміст хлорофілу в тканинах листків на обох ґрунтах на 27,2–52,9%.

Більшість досліджуваних НЧ і препаратів не мали достовірного впливу на рибонуклеазну активність у тканинах листків картоплі. Лише композиція НЧ Zn+Ti+Se+I зменшувала цей показник на обох ділянках на 7,5–9,2%.

Досліджувані НЧ та препарати здебільшого підвищували пероксидазну активність

у тканинах листків картоплі, проте лише на чорноземі типовому вилугуваному за впливу поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I цей показник зростав з достатнім рівнем статистичної значущості на 24%.

Водночас зниження частоти виявлення бактеріальних та грибних хвороб і ступеня ураження ними, зниження частоти виявлення вірусних хвороб та поліпшення фізіологічного стану рослин сприяли зростанню товарності бульб й урожайності картоплі.

Найбільше впливали на товарність бульб композиція НЧ Se+I та її поєднання з препаратом «Азогран», достовірно збільшуючи цей показник на обох типах ґрунтів на 5–20% [30].

НЧ і препарати значно не впливали на вміст крохмалю у бульбах картоплі.

Найбільшу за значенням, закономірну та статистично значущу прибавку врожаю встановлено у варіанті з поєднанням препарату «Азогран» і композиції НЧ Se+I, яка на дерново-підзолистому ґрунті становила 45,35%, на чорноземі типовому вилугуваному — 37,27% (рис. 4) [30].

Дані результатів досліджень свідчать, що в умовах *in vivo* вплив поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I на деякі досліджувані показники (чисельність фосфатмобілізувальних мікроорганізмів у ризосфері, частота виявлення

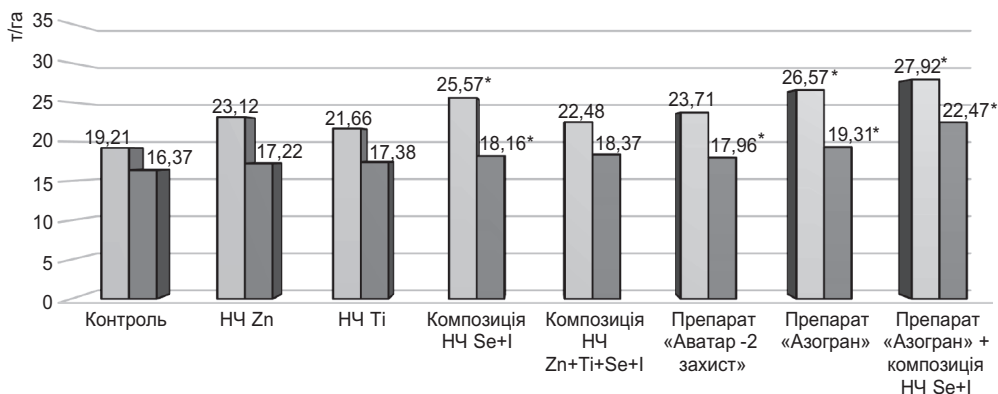


Рис. 4. Урожайність картоплі сорту Сувенір чернігівський за впливу НЧ і препаратів, т/га (середні дані за 2019–2021 рр.): ■ — на дерново-підзолистому ґрунті; ■ — на чорноземі типовому вилугуваному. Знак * свідчить про значну різницю щодо контролю за рівня значущості $P < 0,05$ згідно U-критерію Мана-Уїтні

2. Економічна ефективність застосування НЧ та досліджуваних препаратів у технології вирощування картоплі на дерново-підзолистому ґрунті та на чорноземі типовому вилугуваному (дані за 2019–2021 рр.)

Варіант	Рентабельність, %		Приріст рентабельності, %		Окупність додаткових витрат додатковим прибутком, грн/грн	
	ДП*	ЧВ**	ДП*	ЧВ**	ДП*	ЧВ**
Контроль	54,0	34,3	–	–	–	–
НЧ Zn	81,0	40,1	+27,0	+5,8	12,00	6,93
НЧ Ti	69,3	40,5	+15,3	+6,2	6,59	4,55
НЧ Se+I	96,4	44,9	+42,4	+10,6	10,62	4,22
НЧ Zn+Ti+Se+I	71,9	44,6	+17,9	+10,3	4,44	2,91
«Аватар-2 захист»	84,3	44,1	+30,3	+9,8	10,54	4,87
«Азогран»	106,3	55,7	+52,3	+21,4	17,10	12,84
«Азогран» + НЧ Se+I	111,7	75,8	+57,7	+41,5	11,25	9,28

*ДП — дерново-підзолистий ґрунт; **ЧВ — чорнозем типовий вилугуваний.

бактеріальних хвороб і ступінь ураження ними, товарність бульб та урожайність, фізіологічні показники) сильніший, ніж вплив композиції НЧ Se+I та препарату «Азогран», застосованих окремо. Це свідчить про синергію препарату «Азогран» та композиції НЧ Se+I, тому застосування їх поєднання у технології вирощування картоплі є перспективним.

Визначено результати розрахунків економічної ефективності застосування НЧ, мікробних препаратів та їх поєднань

у технології вирощування картоплі у 2019–2021 рр. (табл. 2).

За результатами розрахунків встановлено, що найвищу рентабельність має застосування поєднання мікробного препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I. Так, на ділянці з дерново-підзолистим ґрунтом рентабельність виробництва картоплі за передпосівної обробки цим поєднанням була вищою, ніж на контролі, на 57,7%, тоді як на чорноземі типовому вилугуваному — на 41,5%.

Висновки

Доведено перспективність застосування НЧ, композицій НЧ і багатокомпонентних мікроелементних препаратів у технології вирощування картоплі. Найефективнішими є композиція НЧ Se+I та препарат «Аватар-2 захист». Виявлено їхню високу ефективність для контролю інфекційних хвороб картоплі. Встановлено позитивний вплив композиції НЧ Se+I на товарність бульб та урожайність картоплі.

Доведено ефективність застосування мікробного препарату «Азогран» для боротьби з бактеріальними та грибовими хворобами картоплі, підвищення

товарності бульб та урожайності.

Установлено наявність синергії між композицією НЧ Se+I та мікробним препаратом «Азогран». Властивості цього поєднання щодо контролю інфекційних хвороб, підвищення якісних і кількісних показників урожаю значно перевищують аналогічні показники композиції НЧ Se+I та препарату «Азогран», застосованих окремо. Це поєднання також позитивно впливало на мікробіоту ризосфери картоплі та фізіологічний стан рослин. За результатами економічних розрахунків, поєднання препарату «Азогран» з композицією НЧ Se+I забезпечувало

найвищий рівень рентабельності виробництва картоплі серед усіх досліджених варіантів.

Найбільшу перспективу має сумісне застосування НЧ і мікробних препаратів у технології вирощування картоплі.

Vasylichenko A.¹, Derevianko S.²

Institute of Agricultural Microbiology and Agro-industrial Production of Ukraine, 97 Shevchenko Str., Chernihiv, 14027, Ukraine; e-mail: ¹top.leader.number.1@gmail.com, ²biopreparat@i.ua; ORCID: ¹0000-0003-2263-8702, ²0000-0002-9409-2473

Use of nanoparticles and nanotechnologies in potato growing

Goal. To analyze the literature data and the results of their own research on the use of nanoparticles and nanotechnologies in potato growing, as well as the results of the combined use of nanoparticles and microbial preparations. **Methods.** Analysis of literature, virological, microbiological, instrumental, field experiment, biochemical, statistical, and economic analysis. **Results.** Nanoparticles with virulicidal, bactericidal and fungicidal activity, as well as those that stimulate the growth of bacteria, were determined in vitro. Thus, Ti nanoparticles, the composition of Se+I nanoparticles, and the drug «Avatar-2 Zahyst» obtained by the nanotechnological method had virulicidal activity against the phytopathogenic virus Potato virus Y in the conditions of vegetation experiments. Using the method of transmission electron microscopy, it was established that Ti nanoparticles can concentrate around Potato virus Y virions and adsorb on their surface, this can be a potential explanation for their virulicidal activity. Zn nanoparticles exhibit bactericidal activity against strains of beneficial soil bacteria *Bacillus subtilis* IMV B7023 and *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aureofaciens* ICM B306 (2687) and a strain of bacteria pathogenic for potatoes — *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* Ac1995, reducing their titer by 100%. The composition of Se+I nanoparticles to one degree or another increases the titer of all tested strains of beneficial soil and phytopathogenic bacteria, in particular the strain *Bacillus subtilis* IMV B7023, which is one of the bioagents of the microbial preparation «Azogran», by 8.46–20.36%. Also, the composition of Se+I nanoparticles showed the strongest antifungal activity,

reducing the diameter of colonies of strains of phytopathogenic fungi *Fusarium* sp. 072 by 25.26–51.75%, *Acremonium cucurbitacearum* 502 — by 78.95–94.22, and *Acremonium strictum* 048 — by 52.67–75.00%, as well as the number of colonies of the strain *Acremonium cucurbitacearum* 502 — by 60,00–86.67%. These properties of nanoparticles, their compositions, and the drug «Avatar-2 Zahyst» were tested in the conditions of a field experiment, and the combined use of nanoparticles with the microbial drug «Azogran» was also investigated. The drug «Avatar-2 Zahyst» was effective against viral, bacterial, and fungal diseases. The combination of the drug «Azogran» with the composition of Se+I nanoparticles turned out to be the best, reducing the frequency of establishment of bacterial and fungal diseases and the degree of their damage, increasing the marketability of tubers, yield, and improving other indicators. In this option, the highest calculated profitability, the value of which was 111.7 and 75.8% in two areas, which is more than in the control by 57.7 and 41.5%, respectively. Among other options, it is worth highlighting the composition of Se+I nanoparticles and the drug «Azogran», however, their effects individually were smaller than in combination. **Conclusions.** The effectiveness of the composition of Se+I nanoparticles, «Avatar-2 Zahyst» and «Azogran» preparations for the control of potato infectious diseases and the prospects of their use in potato cultivation technology were proven. The positive effect of the composition of Se+I nanoparticles and the drug «Azogran» on the marketability of tubers and yield was shown. The synergy between the composition of Se+I nanoparticles and the drug «Azogran» was established. The most promising was the combined use of nanoparticles and microbial preparations in the technology of growing potatoes.

Key words: antiviral, antibacterial, antifungal substances, infectious diseases of potatoes, microbial preparations.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202209-05>

Бібліографія

1. Dolničar P. Importance of potato as a crop and practical approaches to potato breeding. *Solanum tuberosum. Methods and Protocols*; eds.: D. Dobnik, K. Gruden, Ž. Ramšak, A. Coll. New York: Humana, 2021. P. 3–20. doi: 10.1007/978-1-0716-1609-3_1
2. Кожушко Н.С., Сахошко М.М., Савченко П.В., Дітярєв В.М. Тенденції сучасного картоп-

лярства в світі та Україні. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агронія і біологія*. 2014. № 9. С. 131–136.

3. Desk encyclopedia of plant and fungal virology; eds.: M.H. van Regenmortel, B.W. Mahy. Oxford: Academic Press, 2009. 633 p.

4. Warren M., Krüger K., Schoeman A.S. Potato

virus Y (PVY) and potato leafroll virus (PLRV): Literature review for potatoes South Africa. Pretoria: University of Pretoria, 2005.

5. Воробйова Н.Г., Грицев О.А., Юмина Ю.М. Моніторинг збудників бактеріальної та вірусної етіології у насінневому матеріалі картоплі. *Вірусологія, мікробіологія, паразитологія: матеріали II Міжнар. наук. конф. «Сьогодення біологічної науки»* (м. Суми, 09–10 листопада 2018 р.). Суми: ФОП Цьома С.П., 2018. С. 23–25.

6. Adul B., Andrade-Piedra J., Bittara Molina F. et al. Fungal, oomycete, and plasmodiophorid diseases of potato. *Potato Crop. Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*; eds.: H. Campos, O. Ortiz. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 307–350. doi: 10.1007/978-3-030-28683-5_9

7. George W. Sundin, Nian Wang. Antibiotic resistance in plant-pathogenic bacteria. *Annual Review of Phytopathology*. 2018. №. 56. P. 161–180. doi: 10.1146/annurev-phyto-080417-045946

8. Li-Na Yang, Meng-Han He, Hai-Bing Ouyang et al. Cross-resistance of the pathogenic fungus *Alternaria alternata* to fungicides with different modes of action. *BMC microbiology*. 2019. V. 19. Is. 205. P. 1–10. doi: 10.1186/s12866-019-1574-8

9. Sevastos A., Kalampokis I.F., Panagiotopoulou A. et al. Implication of Fusarium graminearum primary metabolism in its resistance to benzimidazole fungicides as revealed by 1H NMR metabolomics. *Pesticide biochemistry and physiology*. 2018. V. 148. P. 50–61. doi: 10.1016/j.pestbp.2018.03.015

10. Xuan Lv, Liumeng Pan, Jiaying Wang et al. Effects of triazole fungicides on androgenic disruption and CYP3A4 enzyme activity. *Environmental pollution*. 2017. V. 222. P. 504–512. doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.051

11. Constanze Knebel, Tanja Heiseb, Ulrich M. Zangerc et al. The azole fungicide tebuconazole affects human CYP1A1 and CYP1A2 expression by an aryl hydrocarbon receptor-dependent pathway. *Food and Chemical Toxicology*. 2019. V. 123. P. 481–491. doi: 10.1016/j.fct.2018.11.039

12. Syromyatnikov M.Y., Kokina A.V., Lopatin A.V. et al. Evaluation of the toxicity of fungicides to flight muscle mitochondria of bumblebee (*Bombus terrestris* L.). *Pesticide biochemistry and physiology*. 2017. V. 135. P. 41–46. doi: 10.1016/j.pestbp.2016.06.007

13. Andrea Wade, Chia-Hua Lin, Colin Kurkul et al. Combined toxicity of insecticides and fungicides applied to California almond orchards to honey bee larvae and adults. *Insects*. 2019. V. 10. Is. 1. P. 20. doi: 10.3390/insects10010020

14. Mohammad Shahid, Bilal Ahmed, Almas Zaidi, Mohd Saghir Khan. Toxicity of fungicides to *Pisum sativum*: a study of oxidative damage, growth suppression, cellular death and morpho-anatomical changes. *RSC advances*. 2018. V. 8. Is. 67.

P. 38483–38498. doi: 10.1039/C8RA03923B

15. Fedotov G.N., Shoba S.A., Fedotova M.F., Gorepekin I.V. Assessment of effects of soil allelopathy and toxicity of fungicides on the development of grain crops. *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. Is. 5. P. 543–549. doi: 10.1134/S1064229319050041

16. Aleš Panáček, Libor Kvítek, Monika Smékalová et al. Bacterial resistance to silver nanoparticles and how to overcome it. *Nature nanotechnology*. 2018. V. 13. Is. 1. V. 65–71. doi: 10.1038/s41565-017-0013-y

17. Gopikrishnan R., Zhang K., Ravichandran P. et al. Synthesis, characterization and biocompatibility studies et al. of zinc oxide (ZnO) nanorods for biomedical application. *Nano-Micro Letters*. 2010. V. 2. Is. 1. P. 31–36. doi: 10.1007/BF03353614

18. Leilei Guo, Kaixun Huang, Hongmei Liu. Biocompatibility selenium nanoparticles with an intrinsic oxidase-like activity. *J. of Nanoparticle Research*. 2016. V. 18. Is. 3. P. 1–10. doi: 10.1007/s11051-016-3357-6

19. Sabyasachi Ghosh, Debashis Rana, Pradip Sarkar et al. Ecological safety with multifunctional applications of biogenic mono and bimetallic (Au–Ag) alloy nanoparticles. *Chemosphere*. 2022. V. 288, P. 132585. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132585

20. Sandhya Mishra, Xiaodong Yanga, Harikesh Bahadur Singh. Evidence for positive response of soil bacterial community structure and functions to biosynthesized silver nanoparticles: An approach to conquer nanotoxicity? *J. of environmental management*. 2020. V. 253. P. 109584. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109584

21. Корнійчук О.В., Плотніков В.В., Гильчук Г.Г. та ін. Вплив комплексного бактеріального препарату Азогран на врожайність пшениці озимої. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2018. № 27. С. 67–73. doi: 10.35868/1997-3004.27.67-73

22. Davod T., Reza Z., Ali V.A., Mehrdad C. Effects of nanosilver and nitroxin biofertilizer on yield and yield components of potato minitubers. *International J. of Agriculture And Biology*. 2011. V. 13. Is. 6. P. 986–990.

23. Дерев'янюк С.В., Васильченко А.В. Науково-методичні рекомендації щодо вивчення впливу наночастинок металів та металоїдів на біологічні та антигенні властивості вірусів. Чернівці: Видавець Брагинець О.В., 2020. 44 с.

24. Дунин М.С., Полова Н.М. Капельный метод анализа вирусов в растениеводстве. Москва: Сельхозиздат, 1937. 47 с.

25. Derevianko S., Vasylychenko A. Reproduction of the strain of bacteria *Bacillus Subtilis* IMV B-7023 in the presence of nanomaterials with different chemical composition. *INNOVATIVE SCIENTIFIC RESEARCHES: EUROPEAN DEVELOPMENT TRENDS AND REGIONAL ASPECT: Collective*

monograph. Riga: «Baltija Publishing», 2020. P. 113–135. doi: 10.30525/978-9934-588-38-9-56

26. Волкогон В.В., Надкернична О.В., Токмакова Л.М. та ін. Експериментальна ґрунтова мікробіологія; за ред. В.В. Волкогона. Київ: Аграрна наука, 2010. 464 с.

27. Vasylychenko A., Derevianko S. Antifungal activity of a composition of Selenium and Iodine nanoparticles. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2021. V. 69. Is. 4. P. 491–500. doi: 10.11118/actaun.2021.044

28. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.

29. Васильченко А.В. Вплив наночастинок металів і неметалів, багатоконпонентного мікроелементного препарату «Аватар-2 захист» та мікробного препарату «Азогран» на ступінь ураження картоплі інфекційними хворобами та частоту їх виявлення. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 4. С. 90–97. doi: 10.33730/2077-4893.4.2021.252961

30. Васильченко А.В. Вплив наночастинок, багатоконпонентного мікроелементного препарату «Аватар-2 захист» та мікробного препарату «Азогран» на продуктивність картоплі сорту Сувенір Чернігівський в умовах Полісся. *Науковий журнал «Рослинництво та ґрунтознавство»*. 2021. Т. 12. № 3. С. 17–27. doi: 10.31548/agr2021.03.017

31. Починок Х.М. Методы биохимического анализа растений. Київ: Наукова думка, 1976. 234 с.

32. Грицаєнко З.М., Грицаєнко А.О., Карпенко В.П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ: НІЧЛАВА, 2003. 320 с.

33. Hellin E., Torrecillas A., Sevilla F. et al. Determination of ribonuclease activity in coloured extracts of citrus leaves. *Biologia plantarum*. 1986. V. 28. Is. 6. P. 424–428. doi: 10.1007/BF02885045

34. Паршикова Т.В. Фізіологія рослин. Практикум. Луцьк: Терен, 2010. 359 с.

35. Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. москва: Медиа-Сфера, 2002. 305 с.

36. Ціноутворення та нормативні витрати в сільському господарстві: теорія, методологія, практика: Т. 1. Теорія ціноутворення та технологічні карти вирощування сільськогосподарських культур; за ред. П.Т. Саблука, Ю.Ф. Мельника, М.В. Зубця, В.Я. Месель-Веселяка. Київ, 2008. 698 с.

37. Ціноутворення та нормативні витрати в сільському господарстві: теорія, методологія, практика: Т. 2. Нормативна собівартість і ціни на сільськогосподарську продукцію; за ред. П.Т. Саблука, Ю.Ф. Мельника, М.В. Зубця, В.Я. Месель-Веселяка. Київ, 2008. 650 с.

38. Дерев'янюк С., Васильченко А. Противірусні властивості наночастинок титану. *Вісник аграрної науки*. 2020. Т. 98. № 8. С. 46–51. doi: 10.31073/agrovisnyk202008-06

39. Elechiguerra J.L., Burt J.L., Morones J.R. et al. Interaction of silver nanoparticles with HIV-1. *J. of nanobiotechnology*. 2005. V.3. Is. 1. P. 1–10. doi: 10.1186/1477-3155-3-6

40. Lozovski V.Z., Lysenko V.S., Rusinchuk N.M. Near-field interaction explains features of antiviral action of non-functionalized nanoparticles. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 2020. V. 11. Is. 1. P. 015014. doi: 10.1088/2043-6254/ab7910