

УДК 632.95.024:[546.824+546.57]-022.532:633.14

<https://doi.org/10.33573/ujoh2023.02.114>

ОЦІНКА ВНЕСКУ ДОПОВАНОСТІ ТИТАНОВМІСНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕСТ-СИСТЕМИ *SECALE CEREALE L.* ДЛЯ СКРИНІНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОТЕНЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Патика Т. І.¹, Демещька О. В.¹, Белюга О. Г.¹, Мовчан В. О.¹, Баля А. Г.²¹ Державна установа «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва Національної академії медичних наук України», м. Київ² Фармацевтичний коледж Мічиганського університету, м. Енн-Арбор, Сполучені Штати Америки

Вступ. Допування є широко використовуваним методом модифікації наночастинок для посилення їхньої електричної, оптичної та біологічної активності. Допованість важкими металами може підвищувати вихідну токсичність наноматеріалу, а отже – негативно впливати на здоров'я працюючих і спричиняти забруднення об'єктів довкілля.

Мета дослідження – оцінити потенційний токсичний вплив додаткової допованості титановмісних нанопорошків важкими металами (сріблом) на рослинній тест-системі *Secale cereale L.*

Матеріали та методи дослідження. У модельному лабораторному досліді оцінено фітотоксичність діоксиду титану (TiO_2), допованого сріблом (наноккомпозит TiO_2+Ag , масова частка $\text{Ag} \sim 4\%$), комплексу діоксиду титану, допованого сріблом (наноккомпозит TiO_2+Ag , масова частка $\text{Ag} \sim 8\%$) та нанопорошку TiO_2 , синтезованого методом термічного розкладу в глюкозоцитратному буфері (1 глюкоза : 4 натрію цитрат) на прикладі насіння *Secale cereale L.* (жито посівне).

Результати. Визначення морфометричних (біометричних) показників тест-об'єкта (*Secale cereale L.*) продемонструвало, що відбувалось пригнічення ростових процесів досліджуваних рослин практично в усіх варіантах з наноматеріалами.

Висновки. Встановлено, що відбувається пригнічення ростових процесів досліджуваних рослин практично в усіх варіантах з титановмісними наноматеріалами. Встановлено, що при дії TiO_2 та наноккомпозиту TiO_2+Ag (4,0 %) спостерігається зниження величини тест-функції в досліді порівняно з контролем у межах від низької до середньої при використанні як тест-об'єкта як проростків жита посівного, так і сперматозоїдів великої рогатої худоби.

Ключові слова: титановмісні наноматеріали, допування, фітотоксичність

Вступ

Протягом останнього десятиліття значна увага науковців була зосереджена на унікальних властивостях наноматеріалів, що є результатом обмеження квантового розміру та поверхневих ефектів. Зокрема, обмеження квантового розміру впливає на енергетичну структуру та фізичні властивості допованих (легованих) наноматеріалів і нанопристроїв. Своєю чергою допування наноматеріалів забезпечує гнучкий спосіб налаштування властивостей матеріалів, зберігаючи при цьому високі площі поверхні. Очікується, що доповані наноматеріали зроблять значний внесок у нанотехнології для практичного застосування в галузях електроніки, фотоніки, оптики, медичних наук, внутрішньої безпеки тощо [1]. Допування різних матеріалів, особ-

ливо напівпровідників, відоме як потужний інструмент для поліпшення властивостей і пошуку доцільного застосування в промисловості, зокрема, у наноелектроніці та нанофотоніці [2]. Явища люмінесценції активно досліджуються в допованих наночастинках з метою виявлення випромінювання, зокрема, у інфрачервоному детектуванні та дозиметрії. Люмінесцентні наночастинки ближнього інфрачервоного діапазону є особливо перспективними для біологічної візуалізації, оскільки за допомогою аутофлуоресценції можна отримати більш високу роздільну здатність зображення. Доповані ізоляторні наноматеріали, включаючи вуглецеві нанотрубки, представляють новий тип високоефективного діагностичного люмінесцентного матеріалу. Як новий різновид біологічних маркерів ізоляторні наночастинки є менш токсичними,

ніж напівпровідникові наночастинки, й є перспективними для виявлення, діагностики та лікування онкологічних захворювань.

Отже, допудвання є широко використовуваним методом модифікації наночастинок для посилення їхньої електричної, оптичної та біологічної активності [3]. Наприклад, наночастинки, які леговані лантанідами, були розроблені як новий клас люмінесцентних наноматеріалів. На відміну від звичайних об'ємних люмінофорів наночастинки забезпечують зручну платформу для регулювання оптичного випромінювання та сприяють інтеграції з іншими функціональними групами, такими як біологічні молекули. Тож такі матеріали є вельми перспективними в біо- та інформаційних технологіях, енергетиці тощо. Домішки допудючих (легуючих) речовин, такі як Cu^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , рідкоземельні та перехідні елементи відіграють важливу роль у зміні електронної структури, зокрема щодо можливостей модуляції основного матеріалу. Також допудвання може посилити протимікробний ефект [4]. Зокрема, срібло, яке леговане полімерним хітозаном та оксидом заліза, забезпечує високу антимікробну ефективність проти бактерій *E. coli*, *B. subtilis* та *S. aureus*. Своєю чергою діоксид титану (TiO_2), допований сріблом та нітрогеном, може підвищити антибактеріальні властивості наночастинок TiO_2 щодо *E. coli* та *B. subtilis* при опроміненні флуоресцентним світлом після культивування протягом 24 год. В іншому дослідженні наночастинки TiO_2 , які доповані Ag, також виявляли токсичну дію щодо бактерій *E. coli*. Композитне покриття $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ показало повне знищення метицилін-резистентного *S. aureus* протягом 24 год у всіх умовах культивування.

Таким чином, доповані титановмісні наноматеріали, зокрема, нанопорошок TiO_2 , який допований сріблом, можуть сприяти знищенню патогенних мікроорганізмів і бути використані в дезінфекційних засобах. У той самий час слід зазначити, що допованість важкими металами може підвищувати вихідну токсичність наноматеріалу, а отже — спричиняти забруднення навколишнього середовища та негативно впливати на здоров'я працюючих. Також слід зазначити, що дані обмеженого кола досліджень показують, що деякі наноматеріали можуть мати екотоксикологічні ефекти [5]. Токсикологічна поведінка наноматеріалів, що безпосередньо контактують з клітинами, залежить від їхнього хімічного складу, кількості, розчинності, форми, площі та

заряду. Вплив може залежати від того, як довго наночастинки залишаються інтактними й як можуть акумулюватися в біосистемі. Домішки, що утворюються в процесі виробництва наноматеріалів, також впливають на їхню токсичність.

У той самий час, як і на початку розвитку нанотехнологій, розробка та впровадження нових матеріалів значно випереджають біомедичні дослідження потенційного небезпечного впливу наноматеріалів на організм людини та об'єкти довкілля.

Наночастинки TiO_2 використовуються у виробництві широкого спектра продукції, що в кінцевому підсумку може створювати додаткове навантаження на екосистеми. Також відомо, що шкіра під впливом ультрафіолетового світла може бути значною мішенню для фотосенсибілізованого пошкодження комерційними нанопродуктами TiO_2 у концентраціях 0,2–3,0 мг/мл [5].

Власними експериментальними дослідженнями встановлено, що наноккомпозит $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (масова частка Ag ~ 4 %) та нанопорошок TiO_2 у концентраціях 3 мг/мл ініціюють патологічні зміни в сперматозоїдах великої рогатої худоби (бика), що є маркерами оксидативного стресу (аномалії головки, середньої частини та хвоста, а також відсутність акросоми тощо), при цьому патологічна дія наноккомпозиту $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (4 %) є більш вираженою [6].

Експериментальні дослідження в умовах *in vitro* показали, що під впливом TiO_2 у концентрації 30 мкг/мл на мононуклеарні клітини периферичної крові спостерігаємо статистично значиме збільшення продукції IL-1. Натомість $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ у концентраціях 30 мкг/мл здатний підвищувати функціональну активність мононуклеарних клітин периферичної крові за продукцією прозапальних цитокінів IL-1, IL-6, TNF- α та продукцію IL-4 у донорів-добровольців, що свідчить про потенційний вплив на формування хронічного запалення та алергічних реакцій у відповідній категорії працівників нановиробництва [7]. Представляють інтерес результати дослідження впливу титановмісних наноматеріалів на корисну ентомофауну — медоносних бджіл (*Apis mellifera*) — оскільки вважається, що людина, яка вживала продукти бджільництва (пиллок, прополіс тощо), може зазнавати впливу наночастинок. Значення LC_{50} , які були оцінені протягом 96 год, становили 5,865 мг/л для TiO_2 та 312,845 мг/л для $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$. Концентраційною групою, яка мала найбільший ефект щодо рівня смертності, була концентрація 100 мг/л для TiO_2 порівняно з 10 мг/л

для Ag-TiO₂. Токсичний ефект наночастинок TiO₂ та TiO₂+Ag збільшувався разом зі збільшенням концентрації та часу експозиції [8].

Вочевидь сьогодні потенційний вплив металовмісних наночастинок на біоту екосистем потребує детальшого вивчення.

Фокусується увага вчених на необхідності застосування комплексного підходу в питанні оцінки потенційної токсичності наночастинок щодо вищих рослин, але такі дані варіабельні та мають фрагментарний характер. Визначення фітотоксичності допованих титановмісних наноматеріалів потребує поглибленого аналізу, особливо в контексті механізмів їхньої взаємодії з рослинним організмом. Через малий розмір наночастинок можуть не розпізнаватися захисними системами організму, вони не піддаються біотрансформації й не виводяться з організму. Отже, існує тенденція до накопичення наноматеріалів як у рослинних, так і в тваринних організмах, а також мікроорганізмах, передачі по харчовому ланцюгу, що збільшує ймовірність їхнього надходження до організму людини.

Мета дослідження – оцінка потенційного токсичного впливу додаткової допованості нанопорошків важкими металами (сріблом) на рослинній тест-системі *Secale cereale L.*

Матеріали та методи дослідження

У дослідженні використано наноматеріали, які синтезовані в Інституті проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України:

- нанопорошок TiO₂, який синтезований методом термічного розкладу;
- комплекс оксиду титану, який допований сріблом (наноккомпозит TiO₂+Ag, масова частка Ag ~ 4 %);
- комплекс TiO₂, який допований сріблом (наноккомпозит TiO₂+Ag, масова частка Ag ~ 8 %).

За даними розробників, нанопорошок TiO₂ має мезопористу будову (мезопори – пори від 2 до 50 нм), містить м'які конгломерати розміром від 50 нм до 500 нм. Середній аеродинамічний діаметр частинок наноккомпозиту TiO₂+Ag (4 %), який був визначений методом динамічного розсіювання світла за допомогою приладу «Analysette 12 DynaSizer» («Fritsch», Німеччина), становив (48,65 ± 1,08) нм, тоді як середній аеродинамічний діаметр TiO₂+Ag (8 %) становив близько 80,8 нм.

Як рослинну тест-систему обрано *Secale cereale L.* Насіння *Secale cereale L.* експонували досліджуваними наноматеріалами в глюкозо-цитратному буфері при співвідношенні 1:4 у концентрації 3 мг/мл дистильованої води. Контрольні рослини вирощували на дистильованій воді. На 4 добу (96 год) проводили морфометричний аналіз проростків дослідних рослин (40 насінин рослин, повторність дослідів – триразова).

Фітотоксичний ефект (ФЕ) визначали за критеріями зміни морфометричних (біометричних) показників тест-культури (довжини пагонів і корінців, маси дослідних рослин).

ФЕ за зміною маси проростків дослідних і контрольних рослин розраховували за формулою:

$$\text{ФЕ} = M_0 - M_x / M_0 \cdot 100, \quad (1)$$

де M_0 – середня маса проростків у контрольному варіанті; M_x – середня маса проростків дослідного варіанту.

ФЕ за зміною довжини пагонів дослідних і контрольних рослин розраховували за формулою:

$$\text{ФЕ} = L_0 - L_x / L_0 \cdot 100, \quad (2)$$

де L_0 – середня довжина рослини, що вирощена в контрольному варіанті; L_x – середня довжина рослин, вирощених у дослідному варіанті.

ФЕ за зміною довжини корінців дослідних і контрольних рослин розраховували за формулою:

$$\text{ФЕ} = R_0 - R_x / R_0 \cdot 100, \quad (3)$$

де R_0 – середня довжина корінців рослин у контрольному варіанті;

R_x – середня довжина корінців рослин у дослідному варіанті.

ФЕ розглядається як індикаторний показник, який аналізують як прояв фітотоксичності (за умови ФЕ > 0) або фітостимулювання, якщо ФЕ < 0. Ефект вважають доведеним, якщо його значення більше за 20,0 %, при фіксації показника < 20 фітотоксичність не проявляється, 20–40 – слабка фітотоксичність, 40–60 – середня фітотоксичність, > 60 – сильний прояв фітотоксичності [9].

За результатами експерименту розраховували індекс токсичності фактора (ІТФ), що оцінюється за формулою:

$$\text{ІТФ} = T\Phi_o / T\Phi_k, \quad (4)$$

де $T\Phi_o$ – значення реєстрованої тест-функції в досліді, $T\Phi_k$ – у контролі [10].

Насіння *Secale cereale L.* експонували досліджуваними наноматеріалами в концентрації 3 мг/мл дистильованої води. На 4 добу (96 год) проводили ваговий аналіз проростків дослідних рослин. Для аналізу брали біологічну повторність – 40 насінин рослин, повторність у досліді – триразова.

Статистичний аналіз проведено за програмою Statistica 8.0, дані обчислено за MS Excel.

Результати дослідження та їх обговорення

Питання потенційного та різнобічного впливу наноматеріалів на метаболічні процеси та фізіологічний стан організму в цілому залишається ключовим у фундаментальних і прикладних дослідженнях взаємодії наночастинок з біологічним середовищем. Відомості про особливості взаємодії допованих металовмісних наночастинок із вищими рослинами (у тому числі ризосферою зернових культур) у процесі онтогенезу мають фрагментарну динаміку, їх необхідно розширювати сучасними, новими знаннями.

Для досліджень фітотоксичності наноматеріалів доцільним є використання нанопорошків у фізіологічному розчині, який може бути застосований протягом першої доби. Використання стерильного розчину

полісахарози з діатриазотом натрію як стабілізатора порошкових титановмісних наноматеріалів є недоцільним через швидку агломерацію наночастинок.

Результати біометричного аналізу тест-рослин *Secale cereale L.*, оброблених досліджуваними титановмісними матеріалами, вказують на те, що відбувалось пригнічення ростових процесів досліджуваних рослин практично в усіх варіантах з наноматеріалами (табл. 1).

Схожість насіння *Secale cereale L.* за дії титановмісних композицій наноматеріалів суттєво не відрізнялася від контрольного варіанту (без обробки).

За росту *Secale cereale L.* з обробкою TiO_2 довжина коренів тест-рослин зменшувалась відносно контролю на 53,3 %, у варіанті з наноконкомпозитом $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (4,0 %) на 59,2 % відповідно. Таку саму закономірність спостерігали й за довжиною надземної маси (листіків) рослин. При вирощуванні проростків після експозиції $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (8,0 %) зафіксовано зниження морфометричних показників на 58,6 % (порівняно з контролем), за виключенням показника довжини корінців (близько до контрольного – до 10,5 мм).

Отримані експериментальні дані дозволили оцінити ФЕ досліджуваних титановмісних матеріалів, який коливався від слабкого до середнього (табл. 2).

Таблиця 1

Біометричні показники 4-денних тест-рослин *Secale cereale L.* за дії титановмісних наноматеріалів (модельний лабораторний дослід)

Варіант досліду	Схожість насіння, %	Маса, г	Відсоток до контролю	Довжина пагонів, мм	Відсоток до контролю	Довжина корінців, мм	Відсоток до контролю
Контроль	94,17 ± 5,20	2,57 ± 0,40	–	11,60 ± 2,73	–	10,03 ± 2,94	–
TiO_2	92,50 ± 4,30	2,28 ± 0,20	88,7	8,21 ± 1,60	70,8	5,35 ± 1,80	53,3
$\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (4,0 %)	89,16 ± 1,40	2,10 ± 0,10	81,7	5,86 ± 2,24	50,5	5,94 ± 4,10	59,2
$\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (8,0%)	95,80 ± 2,90	2,27 ± 0,30	88,3	6,80 ± 0,50	58,6	10,53 ± 4,70	105,0

Таблиця 2

Фітотоксичний ефект за передпосівної обробки насіння *Secale cereale L.* титановмісними наноматеріалами (модельний дослід, 96 год)

Варіант досліду	Фітотоксичний ефект, %			Рівень фітотоксичності
	за довжиною надземної частини	за довжиною кореневої системи	за масою проростків	
Контроль (без обробки)	–	–	–	
Нанопорошок TiO_2	29,2	46,7	11,3	Слабкий
Наноконкомпозит $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (4,0 %)	49,5	40,1	18,3	Слабкий
Наноконкомпозит $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (8,0 %)	41,2	-4,5	24,1	Середній

Аналіз робіт учених з оцінки токсичності розчинів металовмісних наноматеріалів і наші дослідження фітотоксичності через визначення ІТФ (за дією наноматеріалів) з використанням *Secale cereale L.* вказує на специфічні властивості додатково допованих нанопорошків важкими металами та відповідні зміни величини тест-функцій у лабораторному досліді. Розрахунковий ІТФ на морфометричні показники *Secale cereale L.* надано в таблиці 3.

Ці дані узгоджуються з вищенаведеними розрахунками щодо коливання фітотоксичності досліджуваних наноматеріалів від слабкого до середнього рівня. Так, ІТФ за масою проростків *Secale cereale L.* для TiO_2 становив 0,9 (низька токсичність, IV), за довжиною корінців – 0,5 (середня, III), а за довжиною пагонів – 0,7, що вказує на низьку токсичність. Своєю чергою ІТФ за масою проростків *Secale cereale L.* для TiO_2+Ag (4,0 %) за масою проростків становив 0,8 (низька токсичність, IV), за довжиною корінців і проростків – 0,6 і 0,5 відповідно (середня токсичність, III).

Здобуті результати порівняльного аналізу потенційної небезпеки допованих титановмісних наноматеріалів з використанням різних тест-об'єктів (сперматозоїди великої рогатої худоби як маркер оксидативного стресу) виявили значну кількість залишкових тілець після експозиції сперматозоїдів бика наноконкомпозитом TiO_2+Ag , що є результатом загибелі клітин. Крім цього встановлено, що зазначені зміни, поряд з виявленими аномаліями сперматозоїдів,

свідчать на користь більш вираженого патологічного впливу наноконкомпозиту TiO_2+Ag порівняно з наночастинками TiO_2 . У цьому сенсі певний інтерес викликає порівняння даних ІТФ (взаємозв'язки додаткової допованості та біологічної дії титановмісних наноматеріалів), які розраховані як для рослинної тест-системи *Secale cereale L.*, так і тваринної – сперматозоїди великої рогатої худоби (табл. 4).

У результаті досліджень встановлено розрахункове значення ІТФ за індукцією нанопорошком TiO_2 (через наявність морфологічних аномалій сперматозоїдів бика), яке становило 0,76 (низька токсичність, IV). ІТФ для наноконкомпозиту TiO_2+Ag (4,0 %) даний індекс не перевищував 0,5, що відповідає середньому значенню токсичності.

Таким чином, титановмісні наноматеріали потребують комплексного вивчення для забезпечення розширеної інформації щодо фітотоксичності, а також з метою мінімізації ризиків і негативних наслідків використання. Результати досліджень показали, що при дії TiO_2 та наноконкомпозиту TiO_2+Ag (4,0 %) спостерігається зниження величини тест-функції в дослідженні порівняно з контрольним варіантом у межах від низької до середньої при використанні тест-системи *Secale cereale L.* Аналіз попередніх результатів досліджень допованих титановмісних наноматеріалів з використанням тваринної тест-системи (сперматозоїди великої рогатої худоби) дає підстави констатувати про проходження певних процесів ініціації патологічних змін (у тому числі морфологічних аномалій сперма-

Таблиця 3

Індекс токсичності фактора за умов дії наноматеріалів (тест-система *Secale cereale L.*)

Наноматеріал	Індекс токсичності фактора (за масою проростків)	Індекс токсичності фактора (за довжиною корінців)	Індекс токсичності фактора (за довжиною проростків)
Нанопорошок TiO_2	0,9 (низька, IV)	0,5 (середня, III)	0,7 (низька, IV)
Наноконкомпозит TiO_2+Ag (4,0 %)	0,8 (низька, IV)	0,6 (середня, III)	0,5 (середня, III)

Таблиця 4

Індекс токсичності фактора за умов дії наноматеріалів (тест-система – сперматозоїди великої рогатої худоби)

Наноматеріал	Індекс токсичності фактора (за часткою нормальних сперматозоїдів)	Індекс токсичності фактора (за коефіцієнтом пропускання)
Нанопорошок TiO_2	0,76 (низька токсичність, IV)	–
Наноконкомпозит TiO_2+Ag (4,0 %)	0,5 (середня, III)	0,6 (середня, III)

тозоїдів, експонованих досліджуваними матеріалами). Також спостерігається зниження величини тест-функції в досліді порівняно з контролем у межах від низької до середньої.

Висновки

1. На основі визначення морфометричних (біометричних) показників тест-об'єкта жита посівного (*Secale cereale L.*) у модельному лабораторному досліді встановлено, що відбувалось пригнічення ростових процесів досліджуваних рослин практично в усіх варіантах з титановмісними наноматеріалами.
2. Схожість насіння жита посівного за дії титановмісних композицій наноматеріалів суттєво не відрізнялася від контрольного варіанту (без

обробки). За росту *Secale cereale L.* з обробкою TiO_2 довжина коренів тест-рослин зменшувалась відносно контролю на 53,3 %, у варіанті з наноккомпозитом TiO_2+Ag (4,0 %) на 59,2 % відповідно. Таку саму закономірність спостерігали й за довжиною надземної маси (пагонів) рослин. При вирощуванні проростків, експонованих TiO_2+Ag (8,0 %) відбувалося зниження морфометричних показників на 58,6 % (порівняно з контролем), за виключенням показника довжини корінців (близько до контрольного – до 10,5 мм).

3. Встановлено, що при дії TiO_2 та наноккомпозиту TiO_2+Ag (4,0 %) спостерігається зниження величини тест-функції в досліді порівняно з контролем у межах від низької до середньої при використанні як тест-об'єкт як проростків жита посівного, так і сперматозоїдів великої рогатої худоби.

Література

1. Doped Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Potential Use in Nanomedicine. M. Carofiglio, S. Barui, V. Cauda, M. Laurenti. *Applied Sciences (Basel)*. 2020. Vol. 10 (15). P. 5194. <https://doi.org/10.3390/app10155194>.

2. Rare earth doped metal oxide nanoparticles for photocatalysis: a perspective. A. Mehtab, J. Ahmed, S. M. Alshehri et al. *Nanotechnology*. 2022. Vol. 33 (14). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac43e7>.

3. Diez-Pascual A. M. Antibacterial Activity of Nanomaterials. *Nanomaterials (Basel)*. 2018. Vol. 8 (6). P. 359. <https://doi.org/10.3390/nano8060359>.

4. Spread of multidrug-resistant *Escherichia coli* harboring integron via swine farm waste water treatment plant. J. H. Park, Y. J. Kim, Binn-Kim, K. H. Seo. *Ecotoxicology & Environmental Safety*. 2018. No. 149. P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.071>.

5. Nanotitanium dioxide photo catalytic protein tyrosine nitration: a potential hazard of TiO_2 on skin. N. Lu, Z. Zhu, X. Zhao et al. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2008. Vol. 370 (4). P. 675–680. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2008.04.010>.

6. Експрес-оцінка потенційної небезпеки нанозмірних фракцій зварювальних аерозолів. О. В. Де-

мецька, В. О. Мовчан, О. Г. Бєлюга, М. М. Діденко, А. Г. Баля та ін. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2022. Т. 18 (2). P. 130–137. <https://doi.org/10.33573/ujoh2022.02.130>.

7. Дослідження функціональної активності мононуклеарних клітин крові за продукцією цитокінів під впливом фотоактивних титановмісних наноматеріалів *in vitro*. В. М. Рябовол, А. І. Курченко, О. П. Яворовський та ін. *Імунологія та алергологія: наука і практика*. 2021. №. 3. P. 23–30. <https://doi.org/10.37321/immunology.2021.3-03>.

8. Evaluation of the Comparative Acute Toxic Effects of TiO_2 , Ag-TiO_2 and ZnO-TiO_2 Composite Nanoparticles on Honey Bee (*Apis mellifera*). Y. Özkan, İ. İrende, G. Akdeniz et al. *Journal of International Environmental Application & Science*. 2015. Vol. 1 (10). P. 26–36.

9. Григорчук І. Д. Використання рослинних біоіндикаторів для оцінки токсичності ґрунтів на території м. Кам'янець-Подільського. *Біологічні системи*. 2016. Т. 8(2). P. 212–218. <https://doi.org/10.31861/biosystems2016.02.212>.

10. Шматков Г. Г., Яковишина Т. Ф. Система показників комплексної оцінки поліелементного забруднення важкими металами ґрунтів урбоєко-системи. *Екологічні науки*. 2018. Т. 2, №1. P. 25–28.

Patyka T. I.¹, Demetska O. V.¹, Beliuha O. G.¹, Movchan V. O.¹, Balia A. H.²

ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF TITANIUM-CONTAINING NANOMATERIALS USING THE TEST SYSTEM OF *SECALE CEREALE L.* FOR SCREENING STUDIES OF POTENTIAL HAZARD

¹State Institution «Kundiiiev Institute of Occupational Health of National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv

²College of Pharmacy, University of Michigan, Ann Arbor, United States of America

Introduction. Doping is a widely used method of modifying nanoparticles to enhance their electrical, optical, and biological activity. Doping with heavy metals can increase the initial toxicity of the nanomaterial, and therefore negatively affect the health of workers and cause pollution of environmental objects.

The aim of the research – to assess the potential toxic effect of additional doping of titanium-containing nanopowders with heavy metals (silver) on the plant test system *Secale cereale L.*

Materials and methods of research. In a model laboratory experiment, the phytotoxicity of titanium dioxide doped with silver (nanocomposite TiO₂+Ag, mass fraction Ag ~ 4 %), titanium dioxide complex doped with silver (nanocomposite TiO₂+Ag, mass fraction Ag ~ 8 %) and nanopowder of titanium dioxide (TiO₂), synthesized by the method of thermal decomposition in a glucose-citrate buffer (1 glucose: 4 sodium citrate) using the example of *Secale cereale L.* (rye) seeds.

Results. The determination of morphometric (biometric) indicators of the test object (*Secale cereale L.*) demonstrated that the growth processes of the studied plants were inhibited in almost all variants with nanomaterials.

Conclusions. It was established that the growth processes of the studied plants are inhibited in almost all variants with titanium-containing nanomaterials. Under the exposure to titanium dioxide and nanocomposite TiO₂+Ag (4.0 %) there is a decrease in the value of the test function in the experiment in comparison with the control in the range from low to medium when used as a test object as seed rye seedlings, and bovine spermatozoa.

Key words: titanium-containing nanomaterials, doping, phytotoxicity

References

1. Carofiglio M, Barui S, Cauda V, Laurenti M. Doped Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Potential Use in Nanomedicine. *Applied Sciences* (Basel). 2020;10(15):5194. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10155194>.
2. Mehtab A, Ahmed J, Alshehri SM, Mao Y, Ahmad T. Rare earth doped metal oxide nanoparticles for photocatalysis: a perspective. *Nanotechnology*. 2022;33(14). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac43e7>.
3. Díez-Pascual AM. Antibacterial Activity of Nanomaterials. *Nanomaterials* (Basel). 2018;8(6):359. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8060359>.
4. Park JH, Kim YJ, Binn- Kim, Seo KH. Spread of multidrug-resistant *Escherichia coli* harboring integron via swine farm waste water treatment plant. *Ecotoxicology & Environmental Safety*. 2018;149:36–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.071>.
5. Lu N, Zhu Z, Zhao X, Tao R, Yang X, Gao Z. Nanotitanium dioxide photo catalytic protein tyrosine nitration: a potential hazard of TiO₂ on skin. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2008;370(4):675–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2008.04.010>.
6. Demetska OV, Movchan VO, Beliuha OG, Didenko MM, Balia AG, Andrusyshyna IM, Leonenko OB. [Approaches to express potential hazard assessment of nanosized fractions of welding fumes]. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2022;18(2):130–7. DOI: <https://doi.org/10.33573/ujoh2022.02.130>. Ukrainian.
7. Riabovol VM, Kurchenko AI, Yavorovskiy OP, Savchenko V, Taran A. [Investigation of the functional activity of blood mononuclear cells by cytokine production under the influence of photoactive titanium-containing nanomaterials *in vitro*]. *Immunology and allergology: science and practice*. 2021;3:23–30. DOI: <https://doi.org/10.37321/immunology.2021.3-03>. Ukrainian.
8. ÖzkanY, İrende İ, Akdeniz G, Kabakcı D, Sökmen M. Evaluation of the Comparative Acute Toxic Effects of TiO₂, Ag-TiO₂ and ZnO-TiO₂ Composite Nanoparticles on Honey Bee (*Apis mellifera*). *Journal of International Environmental Application & Science*. 2015;1(10):26–36.
9. Hrigorchuk ID. [Use of plants test systems for assess the toxicity of soil in Kamyanets-Podilsky]. *Biological Systems*. 2016;8(2):212–8. DOI: <https://doi.org/10.31861/biosystems2016.02.212>. Ukrainian.
10. Shmatkov GG, Yakovishina TF. [The system of indications in the complex assessment of polyelement soil contamination with important metals in urban ecosystems]. *Ecological Sciences*. 2018;2(1):25–8. Ukrainian.

ORCID ID співавторів та їхній внесок у підготовку та написання статті:

Патика Т. І. (ORCID ID 0000-0003-1316-0516) – постановка лабораторного модельного досліджу, аналіз результатів дослідження, висновки;

Демецька О. В. (ORCID ID 0000-0002-8174-7813) – визначення розмірів наноматеріалів методом динамічного розсіювання світла, проведення лабораторного модельного досліджу, аналіз результатів дослідження, висновки;

Белога О. Г. (ORCID ID 0000-0001-9445-9469) – проведення лабораторного модельного досліджу, аналіз результатів дослідження;

Мовчан В. О. (ORCID ID 0000-0002-6712-7976) – проведення лабораторного модельного досліджу;

Баля А. Г. (ORCID ID 0000-0002-1443-6572) – аналіз літератури з питань допованості наноматеріалів, аналіз результатів дослідження.

Інформація щодо джерел фінансування дослідження: дослідження виконано за темою «Розробка предикторів потенційної небезпеки промислових аерозолів різної дисперсності», № державної реєстрації 0122U000674.

Надійшла: 28 квітня 2023 р.

Прийнята до друку: 30 травня 2023 р.

Контактна особа: Демецька Олександра Віталіївна, провідний науковий співробітник, лабораторія медико-біологічних критеріїв професійних впливів і гігієни праці в аграрному та промисловому виробництві, ДУ «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМНУ». Тел.: + 38 0 50 637 81 08.
Електронна пошта: dalexandra@ukr.net