

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**РУДНІЦЬКА ЛЮДМИЛА ВІКТОРІВНА**

УДК 631.452:631.95:502.7

**ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА АГРОХІМІКАТІВ,  
ОТРИМАНИХ ЗА НАНОТЕХНОЛОГІЯМИ**

03.00.16 «Екологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата сільськогосподарських наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор сільськогосподарських наук, професор  
**Макаренко Наталія Анатоліївна**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
професор кафедри екології агросфери  
та екологічного контролю

**Офіційні опоненти:** доктор сільськогосподарських наук,  
старший науковий співробітник  
**Корсун Світлана Георгіївна**,  
Національний науковий центр  
«Інститут землеробства НААН»,  
завідувач відділу агроекології  
та аналітичних досліджень

доктор сільськогосподарських наук,  
старший науковий співробітник  
**Чабанюк Ярослав Васильович**,  
Інститут агроекології і природокористування НААН,  
завідувач відділу агроекології і біобезпеки

Захист відбудеться «28» квітня 2017 року о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.15 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Генерала Родимцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «27» березня 2017 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Коломієць

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Нанотехнології у галузі рослинництва передбачають використання препаратів новітнього покоління – наноагрохімікатів (нанопрепаратів) із «розумним» вивільненням нанокаталізаторів, які здатні підвищувати продуктивність сільськогосподарських культур у 1,5–2,0 рази. Цей факт стає головним у просуванні їх на ринок і далі у сільськогосподарське виробництво. Проте з кожним роком накопичуються дані, які свідчать про можливі екологічні ризики від застосування нанопрепаратів і ці ризики пов'язані з наночастинками, які входять до їх складу.

Проданчук Н. Г, Балан Г. М. (2009) у своїх роботах показали, що наночастинки володіють комплексом особливих фізичних і хімічних властивостей, які можуть радикально відрізнитися від властивостей цієї ж речовини у формі суцільних фаз або макроскопічних дисперсій.

Роботами J. Besley (2008), M. Hasselov (2008), Л. М. Фатхутдінової (2009), І. С. Чекмана (2009), А. Fan (2010), Х. Х. Хамідуліної (2011), І. В. Анциферової (2010), О. В. Демецької (2010), Г. Г. Онищенко (2010), І. А. Андрусишиної (2011), К. Donaldson (2013), З. С. Клестової, А. М. Головка (2014) та ін. порушено питання щодо високого рівня токсичності наночастинок і необхідності розроблення методів оцінювання їх небезпечності. Незважаючи на те, що кількість таких публікацій щорічно зростає, досліджень щодо впливу наноматеріалів на екологічні системи недостатньо. Мало вивченою залишається проблема залежності токсичності наночастинок від їх фізико-хімічних характеристик.

Згідно національних і міжнародних вимог, агрохімікати, що застосовуються у рослинництві, мають відповідати вимогам безпечності для навколишнього природного середовища. Для цього використовують систему екотоксикологічного оцінювання (показники, критерії, класифікації, рекомендації ВООЗ, стандарти ISO, OECD та ін.). Проте чинна система оцінювання не передбачає врахування особливостей агрохімікатів, до складу яких входять наночастинки. Тому, важливим і актуальним є питання вдосконалення зазначеної системи шляхом врахування особливостей впливу наночастинок на біологічні об'єкти різних рівнів організації. Впровадження такого підходу під час державних випробувань нових видів наноагрохімікатів дозволить попередити можливі негативні впливи на довкілля.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися протягом 2013–2016 рр. на кафедрі загальної екології та безпеки життєдіяльності Національного університету біоресурсів і природокористування України рамках наукових тем: «Наукове обґрунтування екотоксикологічної оцінки нанопрепаратів, що застосовуються у рослинництві» (номер державної реєстрації 0115U003353) та «Розробити науково-методичні основи екотоксикологічної оцінки нанопрепаратів, які використовуються у рослинництві для покращання умов живлення і росту сільськогосподарських рослин» (номер державної реєстрації 0113U003952).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи було вивчення особливостей впливу наноагрохімікатів на біологічні системи різних рівнів організації для розроблення наукових основ їх екотоксикологічного оцінювання.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання:

- дослідити вплив наноагрохімікатів на окремі показники стану агроєкосистеми, а саме на продуктивність сільськогосподарських культур та якість продукції, агрохімічні показники ґрунту, перехід хімічних речовин із ґрунту у рослини;

- вивчити фізико-хімічні характеристики наночастинок, що входять до складу наноагрохімікатів, за використання електронно-мікроскопічних методів дослідження;

- дослідити вплив наноагрохімікатів на особливості розвитку токсичного процесу на різних рівнях організації біологічних систем;

- встановити для наноагрохімікатів залежності доза-ефект за реакцією представників наземної, ґрунтової та водної екосистем;

- виявити найчутливіші біотести для екотоксикологічного оцінювання наноагрохімікатів;

- розробити класифікацію екотоксикологічної небезпечності наноагрохімікатів, яка буде враховувати фізико-хімічні характеристики наночастинок та особливості впливу на біологічні системи.

*Об'єкт дослідження* – токсичний процес, який розвивається внаслідок впливу нанопрепаратів на біологічні системи різних рівнів організації.

*Предмет дослідження* – наноагрохімікати (нанопрепарати), наноматеріали, наночастинки, біологічні системи різних рівнів організації.

**Методи дослідження:** польовий – для дослідження впливу нанопрепаратів на показники стану агроєкосистеми; лабораторний – для дослідження токсичного впливу нанопрепаратів на тест-організми ґрунтової, водної та наземної екосистем на різних рівнях організації живої речовини; встановлення впливу нанопрепаратів на агрохімічні показники ґрунту і показники якості сільськогосподарської продукції; статистичні – для встановлення на основі дисперсійного, регресійного та кореляційного аналізів достовірності отриманих результатів та зв'язку між різними чинниками.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше обґрунтовано наукове положення щодо екотоксикологічного оцінювання наноагрохімікатів, що враховує особливості їх токсичної дії на біологічні системи різних рівнів організації та фізико-хімічні характеристики наночастинок, що входять до їх складу.

Вперше розроблено екотоксикологічну класифікацію наноагрохімікатів, яка передбачає чотири класи небезпечності, враховує особливості їх впливу на екологічні системи, а також розмір і форму наночастинок, що входять до складу препаратів.

Набуло подальшого розвитку вчення про екотоксикокінетику та екотоксикодинаміку препаратів, що застосовуються у рослинництві:

встановлено особливості розвитку токсичного процесу під впливом наноагрохімікатів.

Набуло подальшого розвитку вчення про екотоксикометрію у частині біотестування. Виявлено найчутливіші біотести для встановлення екотоксикологічної небезпечності наноагрохімікатів.

Поглиблено уявлення про взаємозв'язок між фізико-хімічними властивостями наночастинок і токсичністю наноматеріалів. Висунуто припущення, що токсичність наноагрохімікатів визначається фізико-хімічними властивостями наночастинок, що входять до їх складу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертаційного дослідження доцільно використовувати у системі державних випробувань і реєстрації нових препаратів, яку здійснює відділ контролю за обігом пестицидів і агрохімікатів Міністерства екології та природних ресурсів України. Розроблені науково-методичні підходи у процесі екологічної експертизи дозволяють врахувати особливості токсичної дії препаратів, що містять у своєму складі наночастинок, і передбачити їх негативні впливи на ґрунті, водні та наземні екосистеми під час застосування у виробництві.

Установи, яким Міністерство екології та природних ресурсів України надало право здійснювати випробування нових видів агрохімікатів, можуть використовувати науково-методичні рекомендації «Екотоксикологічна оцінка нанопрепаратів для здійснення їх державних випробувань і реєстрації» та «Біотестування нанопрепаратів з врахуванням особливостей їх впливу на нецільові об'єкти природних екосистем».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані вищими навчальними закладами у процесі викладання дисциплін «Екологічна токсикологія», «Екологічна експертиза», «Екологічна безпека» з наряду підготовки спеціалістів «Екологія, охорона навколишнього природного середовища».

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем визначено напрям, мету та завдання дослідження, проведено аналіз наукової літератури, виконано експериментальні та статистичні дослідження, здійснено аналіз одержаних результатів. Здобувачем самостійно написано рукопис кандидатської дисертації, підготовлено до друку статті, тези доповідей.

Висловлюємо подяку доктору сільськогосподарських наук, професору, члену-кореспонденту НААН С. М. Каленській та кандидату сільськогосподарських наук Л. М. Гончар за сприяння у проведенні польових досліджень; кандидату біологічних наук, доценту А. Ф. Ліханову, кандидату біологічних наук, старшому науковому співробітнику Е. П. Щербань, доктору біологічних наук І. А. Козерецькій за сприяння у проведенні лабораторних досліджень; доктору технічних наук, доценту К. Г. Лопатьку за надання консультаційних порад.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати та положення дисертаційної роботи було представлено на: II Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науковій конференції

«Біоресурси планети та біобезпека навколишнього середовища: проблеми та перспективи» (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науковій конференції «Соціально-екологічні проблеми переходу до сталого розвитку: реалії та перспективи XXI століття» (м. Ялта, 2013 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2015 р.); IX Всеукраїнській конференції молодих вчених та спеціалістів «Історія освіти, науки і техніки в Україні», присвяченій 130-річчю появи сільськогосподарської дослідної справи як організації та створення Полтавського дослідного поля (м. Київ, 2014 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Інноваційні та екологічно-безпечні технології виробництва і зберігання сільськогосподарської продукції» (м. Харків, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Природне агровиробництво в Україні: проблеми становлення, перспективи розвитку» (м. Дніпропетровськ, 2015 р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 21 наукову працю, з яких монографія, 4 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 науково-методичні рекомендації, 11 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація у вигляді рукопису викладена на 144 сторінках та складається з 8 розділів, висновків, пропозицій виробництву, списку використаних джерел. Робота ілюстрована 38 таблицями і 36 рисунками. Список використаної літератури включає 224 джерела, у тому числі 63 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

(огляд літератури)

За результатами аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури було виявлено особливості токсичної дії нанорозмірних частинок залежно від їх фізико-хімічної будови. Систематизовано дані щодо специфіки розмірних ефектів і встановлено, що вони, переважно, проявляються для наночастинок менших розмірів. Встановлено, що прогнозування можливого екологічного ризику від застосування нових наноматеріалів є актуальним напрямом досліджень, проте, такі роботи знаходяться на початковому етапі і лише починають розгортатися як в Україні, так і за кордоном. Показано, що розроблення наукових підходів до екотоксикологічної оцінки нанопрепаратів є важливою і своєчасною науковою роботою, яка дасть можливість попередити їх негативні впливи на природні екосистеми.

## МІСЦЕ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дисертаційне дослідження виконано на базі кафедри загальної екології та безпеки життєдіяльності Національного університету біоресурсів і природокористування України впродовж 2013–2016 рр.

Для досягнення поставленої мети та реалізації передбачених завдань досліджували нанопрепарати Nano-Gro та Аватар-1, які містять у своєму складі наночастинки та застосовуються у сільськогосподарському виробництві з метою створення оптимальних умов росту і розвитку сільськогосподарських рослин. Окрім вищезазначених нанопрепаратів, досліджували наномідь, що отримано шляхом спільного осадження з парової фази металу і галогеніду лужних металів (NaCl). Метод отримання наноміді було розроблено Інститутом електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України і надано для роботи на підставі договору про співробітництво.

Польові дослідження здійснювали на базі Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція», що розташований у зоні Північного Лісостепу України (с. Пшеничне Васильківського району Київської області) в умовах стаціонарного польового дослідження ННВЛ кафедри рослинництва.

Досліджували вплив наноагрохімікатів на урожайність і якість пшениці озимої (сорт Бриліант) та буряку цукрового (гібрид Настя). Агротехніка вирощування – традиційна для даної зони. Нанопрепарати вносили шляхом обприскування рослин у період вегетації. Схема дослідження передбачала наступні варіанти: 1 – контроль (без обробки); 2 – препарат Nano-Gro – 100 мг/га; 3 – препарат Аватар-1 – 50 мг/га. Відбір проб рослин, ґрунту, облік урожаю здійснювали відповідно до «Методики польового дослідження» Б. А. Доспехова.

У лабораторних умовах вивчали концентрації, які відповідали дозам внесення нанопрепаратів під сільськогосподарські культури (РД – рекомендована доза у відповідності з регламентами застосування, які надає фірма-виробник):

Nano-Gro: дози від 100 до 10000 мг/га (1 РД–100 РД), відповідно концентрації розчинів коливалися від 0,50 до 50,0 мг/дм<sup>3</sup>;

Аватар-1: дози від 50 до 5000 мг/га (1 РД–100 РД), відповідно концентрації розчинів коливалися від 0,25 до 25,0 мг/дм<sup>3</sup>;

Наномідь: дози від 50 до 150 мг/га (1 РД–3 РД), відповідно концентрації розчинів коливалися від 0,25 до 0,75 мг/м<sup>3</sup>.

Агрохімічні показники ґрунту, а саме: вміст гумусу визначали за ДСТУ 4289:2004, рН – ДСТУ ISO 10390:2007, вміст азоту, що легко гідролізується, за методом Тюріна-Кононової, рухомих форм фосфору і калію за ДСТУ 4115:2002.

Вміст цукрів у буряку цукровому визначали поляриметричним методом.

Загальну чисельність мікроорганізмів у чорноземі типовому середньо суглинковому визначали за методикою Д. Г. Звягінцева.

Фітотоксичність визначали за ГОСТ 12038-84; гальмівну дію нанопрепаратів на ріст вищих рослин за ДСТУ ISO 11269-1:2004 із використанням ячменю сорту Тріумф; нітрифікаційну здатність ґрунту за методом Кравкова; інгібіторну дію на мінералізацію ґрунту за ДСТУ ISO 14238:2003.

Розмір, будову та хімічний склад наночастинок агрохімікатів досліджували за допомогою методу скануючої електронної мікроскопії

(електронний скануючий мікроскоп Tescan Mira 3 із просторовим дозволом 1 нм) на базі лабораторії електронної мікроскопії Товариства з обмеженою відповідальністю «Нано Технології в Медицині».

Токсичний вплив наноагрохімікатів на окремі організми і популяцію вивчали методом біотестування на церіодафніях (*Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg) згідно ДСТУ 4173-2003 4173: 2003.

Для вивчення токсичності нанопрепаратів на рівні клітини використовували Allium test (рослинна тест-система для оцінки мутагенного, мітозмодифікуючого та токсичного ефектів на основі рослини *Allium cepa* L.).

Достовірність та надійність результатів підтверджували за допомогою математичної статистичної обробки одержаних даних за використання Microsoft Office Excel 2010.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

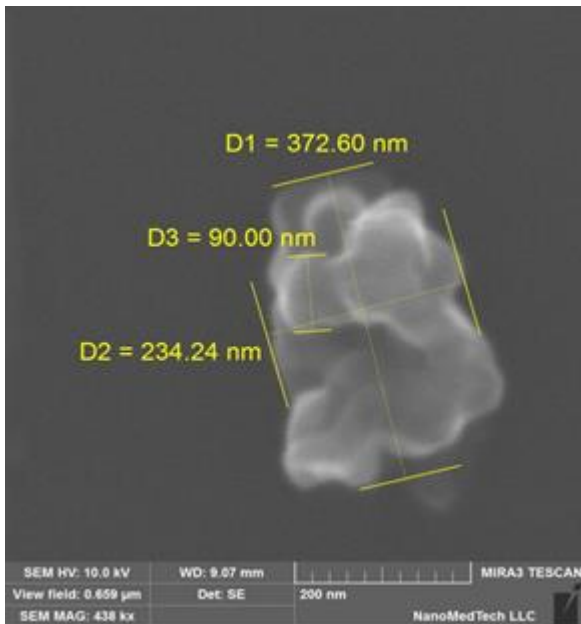
### Вплив наноагрохімікатів на окремі показники стану агроєкосистеми.

Результати дослідження ефективності нанопрепаратів Аватар-1 та Nano-Gro в умовах Північного Лісостепу України підтвердили їх позитивний вплив на продуктивність агрофітоценозу: урожайність пшениці озимої у середньому за 3 роки у разі застосування Аватар-1 склала 3,47 т/га, Nano-Gro – 3,71 т/га (контроль – 2,96 т/га); урожайність буряку цукрового у разі застосування Аватар-1 склала 65,3 т/га, Nano-Gro – 65,8 т/га (контроль – 60,7 т/га). Поряд із цим, проявлялася специфічна дія нанопрепаратів на якість продукції – спостерігалось стимулювання у буряків цукрових розвитку коренеплоду, проте, вміст сухої речовини і цукрів залишався на рівні контрольного варіанту.

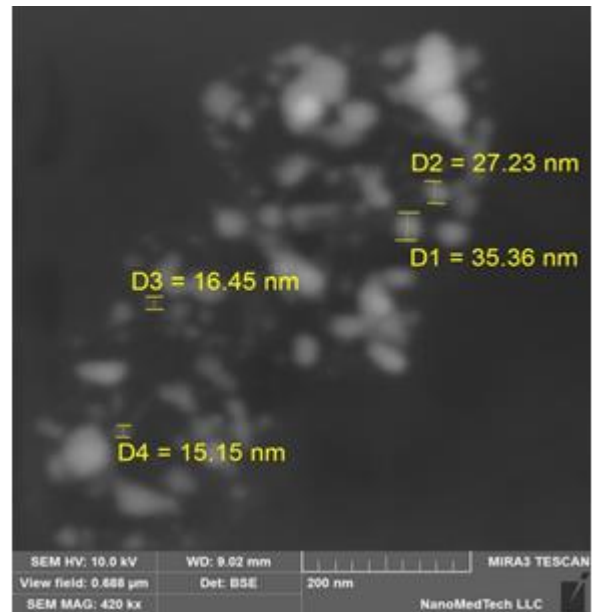
Застосування нанопрепаратів призвело до підвищення вмісту рухомих сполук поживних елементів в орному шарі ґрунту. Враховуючи невисокі дози їх застосування (50–100 мг/га), можна передбачити, що таке явище було наслідком кращого розвитку кореневої системи рослин, збільшення корневих виділень, підвищення розчинності хімічних речовин і активізації їх переходу у ґрунтовий розчин. Водночас, було виявлено, що нанопрепарати активізують перехід хімічних речовин з ризосфери ґрунту до надземних частин рослин: найвищий  $K_p$  свинцю було зафіксовано у разі застосування Nano-Gro –  $38 \cdot 10^{-3}$  (контроль –  $31 \cdot 10^{-3}$ ).

**Електронно-мікроскопічні дослідження фізико-хімічної будови та складу нанопрепаратів.** Оцінка небезпечності нанопрепаратів передбачає обов'язкове вивчення фізико-хімічних особливостей наночастинок. Ідентифікація якісного та кількісного складу за допомогою скануючої електронної мікроскопії дозволила виявити, що у хімічному відношенні наночастинки препарату Аватар-1 представляли комплекс хімічних елементів (% , середній вміст): С – 35,7; О – 14,7; Mg – 2,3; Al – 0,1; Cl – 1,0; Mn – 0,2; Zn – 0,6; Ag – 4,3. До складу наночастинок препарату Nano-Gro входили (%): С – 30,5; О – 9,0; Al – 0,1; S – 0,1; Cl – 0,1; Ca – 0,2; Mn – 2,4; Fe – 4,1; Cu – 4,5. Враховуючи якісний і кількісний склад препаратів, можна передбачати, що небезпечність Аватар-1 будуть визначати нанорозмірні частинки Zn і Ag, а препарату Nano-Gro – Cu.

Наночастинки препарату Аватар-1 мали розмір 26–45 нм, кристалічну будову з окресленими чіткими гранями у вигляді куба і характерною кристалічною граткою, утвореною Ag і Cl, із прикріпленими у вершинах наночастинками інших складових компонентів. Наночастинки препарату Nano-Gro мали розмір 90 нм і аморфну форму (рис. 1, рис. 2). Враховуючи вищезазначене, було висунуто припущення, що нанопрепарат Аватар-1 буде мати вищий рівень токсичності, порівняно з Nano-Gro, оскільки його наночастинки характеризуються кристалічною будовою, меншими розмірами та містить у своєму складі більшу кількість біоцидних хімічних елементів.

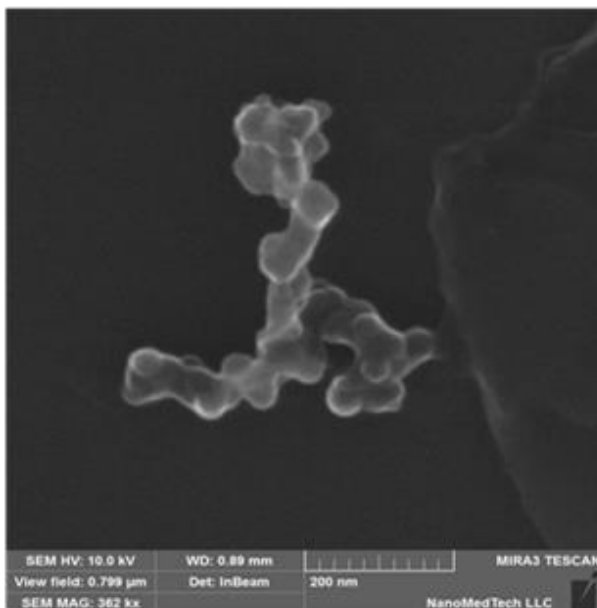


**Nano-Gro**

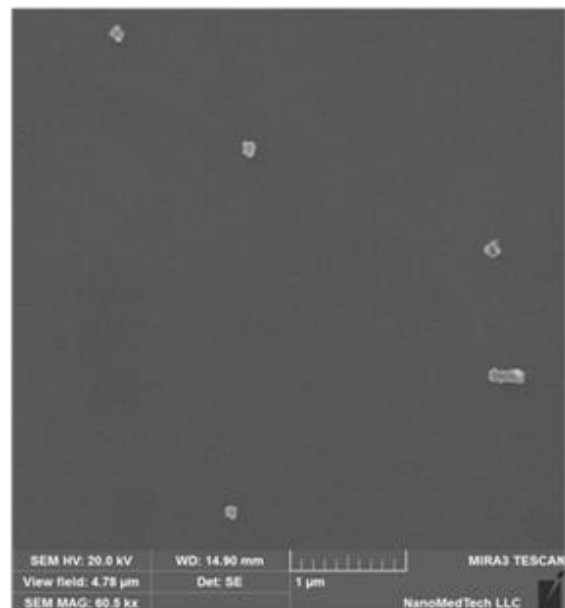


**Аватар-1**

Рис. 1. Розмір елементарних наночастинок, що входять до складу нанопрепаратів



**Nano-Gro**



**Аватар-1**

Рис. 2. Просторова орієнтація та геометрія елементарних наночастинок, що входять до складу нанопрепаратів

**Особливості токсичного процесу на різних рівнях організації живого під впливом нанопрепаратів.** Вивчення токсичного процесу під впливом нанопрепаратів розпочинали з рівня клітини. Дослідження цитотоксичного впливу за використання клітин кореневої меристеми *Allium cepa* L. (Allium-тест) та програмного забезпечення Image-Pro Premier 9.0 (USA), дозволило виявити, що препарат Аватар-1 ініціював токсичний процес – розміри клітин зменшилися на 14 % до контролю та на 17 % відносно Nano-Gro. Останній не виявив токсичної дії на клітини меристеми *Allium cepa* L.

Результати дослідження цитотоксичного ефекту на клітинах *Allium cepa* L. показали, що застосування наноагрохімікатів сприяло зниженню мітотичної активності (МІ з 535 % на контролі знизився до 515–519 % за застосування нанопрепаратів). Водночас спостерігалось збільшення кількості профазних клітин та зменшення їх в наступних фазах поділу: під впливом препарату Аватар-1 зниження клітин в ана- і телофазі сягало 33 та 80 % до контролю, а препарат Nano-Gro – відповідно 67 та 100 % відповідно (табл. 1).

Таблиця 1

**Вплив нанопрепаратів на мітотичну активність меристеми *Allium cepa* L.**

Варіант	Фаза мітотичного поділу				Мітотичний індекс, %
	профаза	метафаза	анафаза	телофаза	
Контроль (вода)	150/100*	3/100	3/100	5/100	535/100
Аватар-1	202/35	2/33	2/33	1/80	515/4
Nano-Gro	199/33	4/33	1/67	0/100	519/3

Примітка: \*чисельник – фактичні значення кількості клітин в окремих фазах поділу; знаменник – % до контролю (значення по модулю).

Під впливом наноміді змінювалась тривалість окремих фаз мітотичного циклу. Зафіксовано пригнічення активності мітотичного поділу на стадії метафази – кількість клітин у цій фазі зросла від 1,86 до 5,07 %. Зменшення кількості клітин у ана- та телофазі порівняно з контролем може свідчити про порушення веретена поділу (рис. 3).

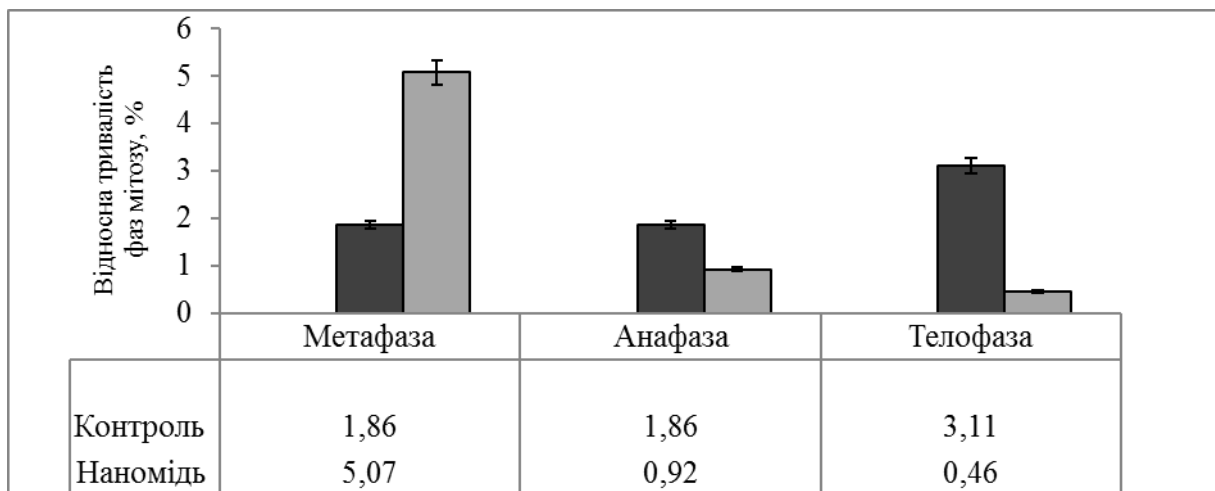


Рис. 3. Вплив наноміді на тривалість окремих фаз мітозу клітин *Allium cepa* L.

Виявлені відхилення можна розглядати як наслідок впливу наночастинок, що входять до складу нанопрепаратів, на клітинні структури.

Спостереження за механізмом поділу клітин *Allium cepa* L. показало, що під впливом нанопрепаратів на стадії ана- і телофази відбувалися аберації, пов'язані з певним порушенням структури хромосом, пошкодженням мітотичного веретена, а також зі зміною поведінки хромосом на веретені поділу. Під дією препарату Аватар-1 спостерігалось відставання поділу хромосом в ана- і телофазі, що може сигналізувати про можливість часткових втрат генетичної інформації у подальшому. Під дією препарату Nano-Gro спостерігалось пошкодження мітотичного веретена поділу, що призвело до утворення мостів. При цьому поділ клітин призупинився в телофазі (рис. 4).

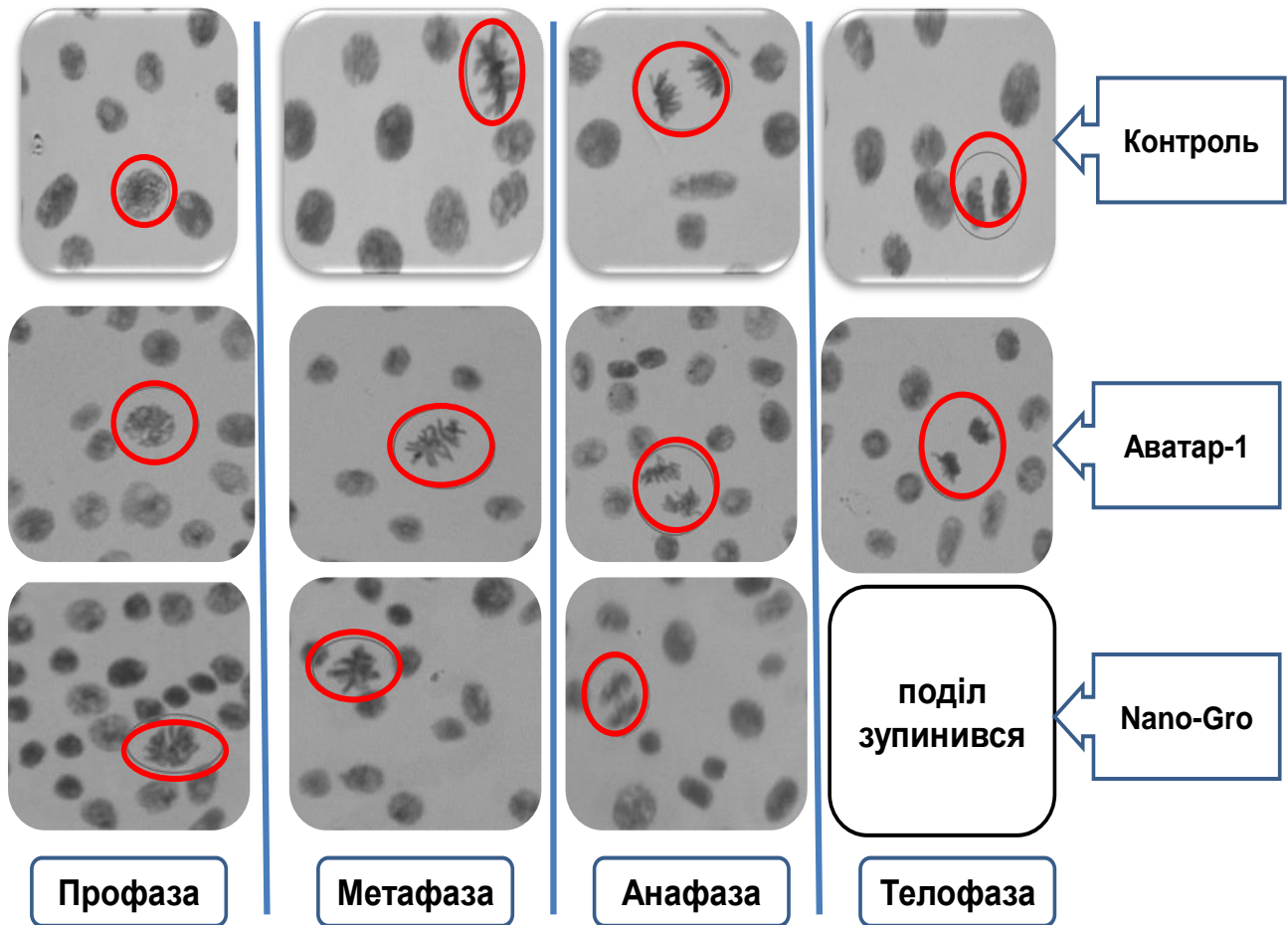


Рис. 4. Вплив нанопрепаратів на мітотичний поділ клітин *Allium cepa* L.

Дослідження токсичного процесу, ініційованого нанопрепаратами на рівні органів рослин вивчали за реакціями-відгуками рослин (фіто-тест: крес-салат (*Lepidium sativum* L.) і редис посівний з білим кінчиком (*Raphanus sativus* L.). Було встановлено, що інгібуюча дія препарату Аватар-1 була на 27 % вищою за аналогічну дію препарату Nano-Gro.

Токсичний процес, індукований нанопрепаратами на рівні еколого-трофічних груп мікроорганізмів ґрунту (польовий дослід), проявлявся активніше за використання препарату Аватар-1 порівняно з Nano-Gro. Так, підживлення пшениці озимої препаратом Аватар-1 (1 РД) призвело до

зменшення загальної чисельності ґрунтових мікроорганізмів та мікроміцетів відповідно на 61 та 83 %. Обробка посівів пшениці озимої препаратом Nano-Gro (1 РД) виявило стимулюючу дію на мікроорганізми ґрунту.

Токсичний процес, індукований нанопрепаратами на рівні популяції *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg, за використання препарату Nano-Gro призвів до летального ефекту 78 % материнських особин з одночасним зниженням кількості життєздатних дочірніх особин та повторно закладених самкою яєць. Проте токсична дія його була значно меншою порівняно із препаратом Аватар-1. Застосування останнього призвело до повної загибелі самок (табл. 2). Водночас спостерігалися значні морфологічні відхилення – народження мертвих потомків, викидання яєць на різних стадіях розвитку, народження потомків з недорозвинутим панциром тощо.

Таблиця 2

### Вплив нанопрепаратів на популяцію *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg

Варіант	Материнські особини	Дочірні особини	Повторно відкладені самкою яйця
Контроль	18/10*	36/0	63/0
Nano-Gro (1 РД)	4/78	22/39	1/98
Аватар-1 (1 РД)	0/100	10/72	0/100

Примітки: \*чисельник – кількість життєздатних особин/яєць; знаменник – % загиблих особин/яєць, що розчинились, відносно контролю.

Таким чином, дослідження проведені на різних рівнях організації живого, дозволили встановити, що нанопрепарати ініціюють токсичний процес, який починає розвиватися від рівня клітини і досягає рівня популяції. Порівняння токсичності нанопрепаратів показало, що Аватар-1 у більшості випадків є більш безпечнішим для живих організмів, ніж Nano-Gro. Можна припустити, що однією з причин такого явища є хімічний склад, кристалічна будова і менший розмір наночастинок, які входять до складу нанопрепарату Аватар-1.

**Дозозалежні ефекти токсичного впливу нанопрепаратів.** Дослідження, проведені на представниках наземної, ґрунтової і водної екосистем, дозволили встановити, що розвиток токсичного процесу під впливом нанопрепаратів істотно залежав від дози їх застосування: із збільшенням дози нанопрепаратів збільшувалася їх токсична дія.

За реакцією наземних організмів (вищих рослин) було встановлено найвищі дози, які не викликали токсичного ефекту (NOAEL): для Аватар-1 – 2,5 мг/га, для Nano-Gro – 1,2 мг/га; найнижчі дози, які викликали токсичний ефект (LOAEL) – відповідно 4,0 і 10 мг/га. Токсичність за показником LC<sub>50</sub> для Аватар-1 складала 158 мг/га, для Nano-Gro – 32 мг/га, для наноміди – 200 мг/га.

За реакцією водних організмів (ракоподібних) було встановлено, що застосування препарату Аватар-1 у рекомендованій дозі призвело до 100 %

загибелі самок церіодафній ( $LC_{100} = 0,25 \text{ мг/м}^3$ ), для препарату Nano-Gro  $LC_{50}$  склала  $1,5 \text{ мг/дм}^3$  і відповідала дозі  $300 \text{ мг/га}$ .

За реакцією ґрунтових організмів (мікроорганізмів циклу азоту) було встановлено, що для препарату Аватар-1  $LC_{50}$  склала  $1,26 \text{ мг/дм}^3$ , що відповідало дозі  $251 \text{ мг/га}$ . Препарат Nano-Gro сприятливо впливав на процеси нітрифікації ґрунту – її рівень перевищував контрольний варіант, проте, збільшення дози призводило до пригнічення активності мікробіологічних процесів.

**Виявлення найчутливіших біотестів для екотоксикологічного оцінювання наноагрохімікатів.** З цією метою було досліджено реакції-відгуків організмів-стенобіонтів та за рівнем чутливості оцінено доцільність їх використання. Реакцію організмів-стенобіонтів оцінювали за розмірами відхилення від контролю: зона оптимуму (відхилення не перевищує 10 %), зона комфорту (відхилення в межах 10–25 %), зона песимуму (відхилення перевищує 25 %). Чутливість біотестів позначали наступним чином: (+ – мало чутливий, ++ – помірно чутливий, +++ – чутливий, ++++ – високо чутливий) (табл. 3).

Таблиця 3

**Оцінювання біотестів за критерієм чутливості відносно токсичної дії нанопрепаратів**

Біотест			Чутливість, min/max	
Вищі рослини	Морфометричні показники розвитку рослин	довжина кореня	крес-салат	++/++++
			редис	+
		довжина стебла	крес-салат	+/>++
			горох	+
			редис	+
			крес-салат	+/>+++
	Енергія проростання насіння	горох	+/>++	
		редис	+	
		Гальмівна дія на розвиток кореневої системи	+	
	Ґрунтові бактерії, що беруть участь у перетворенні сполук азоту, процеси інгібіції мінералізації			+/>++++
Гідробіонти – ракоподібні (показники гострої токсичності для <i>Ceriodaphnia affinis</i> Lilljeborg)			+++/>++++	
Процеси, що відбуваються у рослинній клітині (Allium-test на клітинах кореневої меристеми <i>Allium cepa</i> L)			++++	

Отже, було встановлено, що для оцінювання токсичності нанопрепаратів за реакцією біотестів доцільно використовувати показники, що характеризують поділ клітин меристематичної тканини *Allium cepa* L.; морфометричні показники розвитку крес-салату; показники активності ґрунтових бактерій, що приймають участь у циклі азоту; характеристики популяції ракоподібних (*Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg).

**Екотоксикологічна оцінка небезпечності нанопрепаратів для попередження їх негативного впливу на природні екосистеми.** Розроблення системи екотоксикологічного оцінювання нанопрепаратів базувалося на чинних науково-методичних підходах, які використовуються у процесі державних випробувань і реєстрації препаратів (науково-методичні рекомендації «Екологічна експертиза документації державних випробувань пестицидів і агрохімікатів», затверджені науково-експертною радою Міністерства екології та природних ресурсів України) та врахуванні особливостей наночастинок, що входять до їх складу, оскільки саме вони визначають рівень екологічної небезпечності.

За результатами власних досліджень токсичності нанопрепаратів відносно біосистем, а також за врахування літературних даних (Гусєв А. І., 2005; Глущенко Н. Н., 2010; Глушкова А. В., 2011) було визначено, що найвищим рівнем токсичності можуть характеризуватися нанопрепарати, до складу яких входять наночастинки розміром до 10 нм (атоми і атомні молекули, молекулярні, ікосаедричні металічні кластери); високим – нанопрепарати, до складу яких входять наночастинки розміром від 10 до 50 нм (нанокристалічні матеріали); середнім – нанопрепарати, до складу яких входять наночастинки розміром від 51 до 100 нм (субмікростристалічні матеріали); низьким – препарати, до складу яких входять частинки розміром 100 нм і більше (крупнозернисті матеріали).

Для встановлення рівнів впливу використовували принцип екологічної толерантності організмів і біосистем. За оптимум приймали контрольний варіант – функціонування біосистеми за відсутності впливу нанопрепарату. Досліджували відхилення від оптимального стану біосистеми і визначали амплітуду мінливості фактору. За розмірами відхилення реакції біосистеми від оптимуму робили висновки про можливий негативний вплив нанопрепаратів на біосистеми, що тестувалися, %:

відхилення 51–100	I клас – надзвичайно небезпечний;
відхилення 26–50	II клас – небезпечний;
відхилення 10–25	III клас – помірно небезпечний;
відхилення <10	IV клас – мало небезпечний.

Результати проведеної роботи стали основою класифікації нанопрепаратів за рівнем впливу на біологічні системи (табл. 4).

За використання розробленої класифікації було здійснено екотоксикологічне оцінювання наноагрохімікатів та наноміді. Такий підхід дозволив виявити рівень їх небезпечності за окремими показниками, а саме:

Аватар-1 за розміром і формою наночастинок відносився до I–II класу небезпечності, за цитотоксичністю – до II–III класу, токсичністю відносно

водних організмів – до I класу, токсичністю відносно мікроорганізмів циклу азоту – II класу, фітотоксичністю – I–IV класу небезпечності.

Nano-Gro за розміром і формою наночастинок відносився до III–IV класу небезпечності, за цитотоксичністю – до I–IV класу, токсичністю відносно водних організмів – до II класу, токсичністю відносно мікроорганізмів циклу азоту – IV класу, фітотоксичністю – I–IV класу небезпечності.

Таблиця 4

**Класифікація наноагрохімікатів за показниками впливу на екологічну систему**

Показник	Клас небезпечності			
	I	II	III	IV
<b>Специфічні показники</b>				
Розмір наночастинок, нм	<10	10–50	51–100	>100
Форма наночастинок	кристалічна		аморфна	
Мітотичний індекс (MI), відхилення від контролю, %	>50	26–50	10–25	<10
Розмір клітин, відхилення від контролю, %	>50	26–50	10–25	<10
<b>Вплив на водні організми:</b>				
Гостра токсичність для риб і дафній, LC <sub>50</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	≤1,0	1,1–10	10,1–100	>100
Загибель популяції дафній (материнські, дочірні особини), % до контролю	>50	26–50	10–25	<10
Гостра токсичність для водоростей, EC <sub>50</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	≤1,0	1,1–10	10,1–100	>100
<b>Вплив на мезо- і мікроорганізми ґрунту:</b>				
Гостра токсичність для ґрунтових черв'яків, LC <sub>50</sub> , мг/кг ґрунту	<1	1–10	11–100	101–1000
Зниження чисельності/активності процесів, %	>50	26–50	10–25	<10
Час відновлення, міс	>6	3–6	1–2	<1
Інгібіторна дія на мінералізацію, ID, %	51–100	25–50	10–25	<10
<b>Фітотоксичність, відхилення від контролю, %:</b>				
Морфометричні показники розвитку стебла	>50	26–50	10–25	<10
Морфометричні показники розвитку кореню	>50	26–50	10–25	<10
Енергія проростання насіння	>50	26–50	10–25	<10
Гальмівна дія на розвиток кореневої системи	>50	26–50	10–25	<10
<b>Гостра токсичність для птахів, мг/кг:</b>				
LC <sub>50</sub> дітарна	≤500	501–1000	1001–5000	>5000
LD <sub>50</sub> гостра	≤50	51–500	501–2000	>2000
<b>Гостра токсичність для бджіл, мкг/бджолу:</b>				
LD <sub>50</sub> контактна	≤0,1	≤1	>1–≤10	>10
LD <sub>50</sub> оральна	≤0,1	≤1	>1–≤10	>10

Отже, отримані результати дозволили зробити висновок, що наноагрохімікати характеризувалися високим рівнем цитотоксичності і токсичності відносно водних організмів. Простежувалася тенденція вищого

рівня небезпечності відносно препарату Аватар-1, до складу якого входили наночастинки меншого розміру кристалічної будови.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі за результатами теоретичних узагальнень і експериментальних досліджень обґрунтовано та розроблено наукове положення щодо екотоксикологічного оцінювання наноагрохімікатів, що враховує особливості їх токсичної дії на біологічні системи різних рівнів організації та фізико-хімічні характеристики наночастинок, що входять до складу.

1. Наноагрохімікати в невисоких дозах застосування (50–100 мг/га) збільшують вміст рухомих сполук поживних елементів в орному шарі ґрунту, активізують перехід хімічних речовин із ризосфери до надземних частин рослин; підвищують продуктивність сільськогосподарських культур (до 1,6–2,0 рази). Показано, що підвищення продуктивності сільськогосподарських рослин не завжди супроводжується покращанням якості продукції.

2. Наноагрохімікати відрізняються за хімічним складом, будовою і розміром наночастинок, що входять до їх складу: препарат Аватар-1 містить наночастинки із кристалічною будовою і розміром 26–45 нм, препарат Nano-Gro – з аморфною і розміром 90 нм. Висунуто припущення про більш високий рівень токсичності нанопрепарату Аватар-1 відносно Nano-Gro.

3. Наноагрохімікати індукують токсичний процес, який реєструється на різних рівнях організації біосистем: на рівні клітини спостерігається порушення структури хромосом, процесу поділу клітин, виникнення ризику зміни генетичної інформації; на рівні органів і організму – пригнічення процесів росту і розвитку; на рівні популяції – зміни загальної чисельності окремих еколого-трофічних груп, вікових і просторових характеристик.

4. Розвиток токсичного процесу прямопропорційно залежить від дози застосування наноагрохімікатів. Доза, яка не спричиняє пригнічення росту і розвитку вищих рослин (NOAEL) для Аватар-1 складає 2,5 мг/га, Nano-Gro – 1,2 мг/га; пригнічення ростових процесів на 50 % у рослин-стенобіонтів прослідковується за дози Аватар-1 – 158 мг/га, Nano-Gro – 32 мг/га.

Встановлено високий рівень токсичності наноагрохімікатів відносно водних організмів: для церіодафній LC<sub>100</sub> Аватар-1 – 0,25 мг/м<sup>3</sup>; LC<sub>50</sub> Nano-Gro – 1,5 мг/дм<sup>3</sup>. Аватар-1 пригнічує ґрунтові мікроорганізми циклу азоту (за показниками нітрифікаційної здатності) на 50 % за дози 251 мг/га. Препарат Nano-Gro у рекомендованій дозі 100 мг/га позитивно впливає на процеси нітрифікації ґрунту, проте, збільшення дози зумовлює пригнічення активності мікробіологічних процесів.

5. Визначено найчутливіші біотести для оцінювання токсичності наноагрохімікатів: показники, що характеризують поділ клітин меристематичної тканини (тест із *Allium cepa* L.); морфометричні показники розвитку вищих рослин (біотест крес-салат); показники активності ґрунтових бактерій – мікроорганізмів, що приймають участь у циклі азоту і визначають рівень нітрифікаційної здатності ґрунту; характеристики популяції водних організмів (ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg).

6. Вдосконалено чинну систему показників, нормативів і критеріїв екотоксикологічного оцінювання, яку використовують під час державних випробувань нанопрепаратів. Запропоновано існуючу схему доповнити показниками цитотоксичності і характеристиками розміру та форми наночастинок, що дозволить більш об'єктивно здійснювати прогноз їх екологічної небезпечності.

7. Обґрунтовано і розроблено класифікацію наноагрохімікатів, яка передбачає їхній поділ на чотири класи небезпечності та враховує фізико-хімічні характеристики наночастинок, цитотоксичність, фітотоксичність, а також традиційні показники – вплив на водні, ґрунтові та наземні організми.

8. За показниками впливу на біоту водних, ґрунтових та наземних екосистем вищим рівнем токсичності відзначився препарат Аватар-1 відносно препарату Nano-Gro, що залежало від дози застосування, хімічного складу, розміру та форми (геометрії) наночастинок, які входили до їхнього складу.

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

У процесі державних випробувань і реєстрації нових препаратів, яку здійснює відділ контролю за обігом пестицидів і агрохімікатів Міністерства екології та природних ресурсів України, доцільно використовувати розроблені науково-методичні підходи, що дозволить врахувати особливості токсичної дії препаратів, які містять у своєму складі наночастинок, і передбачити їх негативні впливи на ґрунтові, водні та наземні екосистеми під час застосування у виробництві.

Установи, яким Міністерство екології та природних ресурсів України надало право здійснювати випробування нових видів агрохімікатів, можуть використати науково-методичні рекомендації «Екотоксикологічна оцінка нанопрепаратів для здійснення їх державних випробувань і реєстрації» та «Біотестування нанопрепаратів з врахуванням особливостей їх впливу на нецільові об'єкти природних екосистем».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані у процесі викладання у вищих навчальних закладах дисциплін «Екологічна токсикологія», «Екологічна експертиза», «Екологічна безпека» з наряду підготовки спеціалістів «Екологія, охорона навколишнього природного середовища».

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Монографія

1. Макаренко Н. А., Бондарь В. І., Рудніцька Л. В., Сальнікова А. В. Нанопрепарати у рослинництві: екотоксикологічне оцінювання небезпечності: [монографія]. К.: ЦП «Компринт», 2016. 110 с. *(Здобувачем здійснено аналіз літературних джерел, узагальнення матеріалів, участь в оформленні).*

#### Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Макаренко Н. А., Каленська С. М., Рудніцька Л. В. Біологічна ефективність та екологічна безпечність наноагрохімікатів // Науковий вісник

Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: «Агрономія». 2015. Вип. 210. Ч. 1. С. 91–96. *(Здобувачем проведено польові, лабораторні дослідження та підготовлено статтю до друку).*

3. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** Екотоксикологічна оцінка наноагрохімікатів за впливом на біоту ґрунтової та водної екосистем // Таврійський науковий вісник. 2015. Вип. 94. С. 133–138. *(Здобувачем проведено лабораторні дослідження та підготовлено статтю до друку).*

4. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** До питання екотоксикологічної оцінки нанопрепаратів // Вісник Уманського національного університету садівництва. 2015. № 2. С. 8–13. *(Здобувачем проведено лабораторні дослідження та підготовлено статтю до друку).*

5. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** Цитотоксичність нанопрепаратів, що застосовуються у рослинництві // Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. 2016. № 1 (53). Т. 1. С. 152–158. *(Здобувачем проведено лабораторні дослідження та підготовлено статтю до друку).*

#### **Статті у наукових фахових виданнях України,**

##### **включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

6. Makarenko N., **Rudnytska L.**, Bondar V. Peculiarities of ecotoxicological assessment nanoagrochemicals used in crop productio // Annals of Agrarian Science. 2016. Т. 14. Вип. 2. С. 35–41. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, підготовлено матеріали до друку).*

7. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** Екотоксикологічне оцінювання нанопрепаратів шляхом біотестування: [електронний ресурс] // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2015. № 4 (53). – Режим доступу: [http://nd.nubip.edu.ua/2015\\_4/3.pdf](http://nd.nubip.edu.ua/2015_4/3.pdf). *(Здобувачем проведено аналіз літературних джерел, отримано експериментальні дані, підготовлено матеріали до друку).*

##### **Науково-методичні рекомендації:**

8. Макаренко Н. А., Бондарь В. І., **Рудніцька Л. В.**, Сальнікова А. В. Біотестування нанопрепаратів з врахуванням особливостей їх впливу на нецільові об'єкти природних екосистем: [науково-методичні рекомендації]. К., 2015. 42 с. *(Здобувачем узагальнено матеріали, взято участь у оформленні рекомендацій до друку).*

9. Макаренко Н. А., Бондарь В. І., **Рудніцька Л. В.**, Сальнікова А. В. Екотоксикологічна оцінка нанопрепаратів для здійснення їх державних випробувань і реєстрації: [науково-методичні рекомендації]. К., 2016. 36 с. *(Здобувачем узагальнено матеріали, взято участь у оформленні рекомендацій до друку).*

10. Бучацький Л. П., Арсан О. М., Макаренко Н. А., Рибальченко В. К., Щербань Е. П., Косолап М. П., Сикало О. О., **Рудніцька Л. В.** Екологічна експертиза документації державних випробувань пестицидів і агрохімікатів: [науково-методичні рекомендації]. К., 2016. 33 с. *(Здобувачем узагальнено матеріали, взято участь у оформленні рекомендацій до друку).*

### Тези наукових доповідей:

11. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** Перспективи та ризики використання нанодобрив у сільському господарстві України // Екологія – філософія існування людства: II Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 22–23 квітня 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 30–31. *(Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку).*

12. Макаренко Н. А., Бондарь В. І., **Рудніцька Л. В.** Методологія визначення екологічних ризиків при застосуванні наноагрохімікатів у рослинництві // Соціально-екологічні проблеми переходу до сталого розвитку: реалії та перспективи XXI століття: Міжнародна наукова конференція, м. Ялта, 24–27 вересня 2013 року: тези доповіді. Ялта, 2013. С. 71–74. *(Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку).*

13. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** Екотоксикологічні аспекти перспектив та ризиків застосування наноагрохімікатів у рослинництві // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 16–18 жовтня 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 30. *(Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку).*

14. Макаренко Н. А. Бондарь В. І., **Рудніцька Л. В.** Наукове обґрунтування безпечного застосування наноагрохімікатів у рослинництві // Історія освіти, науки і техніки в Україні: IX Всеукраїнська конференція молодих учених та спеціалістів, м. Київ, 22 травня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 282–284. *(Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку).*

15. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.** Токсикологічна оцінка нано-препаратів за впливом на біологічні системи // Екологія – філософія існування людства: Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 23–25 квітня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 129. *(Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку).*

16. Плачинда О. М., **Рудніцька Л. В.**, Макаренко Н. А. Визначення екологічної безпечності нових видів наноагрохімікатів // Екологія – філософія існування людства: Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 23–25 квітня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 137. *(Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку).*

17. Рудніцька Л. В. Екотоксикологічна оцінка нанорозмірних металів // Інноваційні та екологічно безпечні технології виробництва і зберігання сільськогосподарської продукції: Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, м. Харків, 29–30 жовтня 2015 року: тези доповіді. Х., 2015. С. 163–165.

18. Макаренко Н. А., **Рудніцька Л. В.**, Ліханов А. Ф. Екотоксикологічна оцінка нанопрепаратів, що використовуються в сільському господарстві // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 28–31 жовтня

2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 26. (*Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку*).

19. Макаренко Н. А., Бондарь В. І., Сальнікова А. В., Рудніцька Л. В. Принципи нормування і оцінювання технологій за впливом на стан агроєкосистем // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 28–31 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 25. (*Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку*).

20. Макаренко Н. А., Сальнікова А. В., Бондарь В. І., Рудніцька Л. В. Обґрунтування загальних та спеціальних вимог для оцінювання сільськогосподарського підприємства на відповідність вимогам органічного виробництва // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 28–31 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 27–28. (*Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку*).

21. Makarenko N., Bondar V., Salnikova A., Rudnitska L. Methods of getting the safe and qualitative agricultural product // Інноваційні та екологічно безпечні технології виробництва і зберігання сільськогосподарської продукції: Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, м. Харків, 29–30 жовтня 2015 року: тези доповіді. Х., 2015. С. 11–12. (*Здобувачем узагальнено матеріали, підготовлено тези до друку*).

## АНОТАЦІЯ

**Рудніцька Л. В. Екотоксикологічна оцінка агрохімікатів, отриманих за нанотехнологіями.** – На правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата сільськогосподарських наук зі спеціальності 03.00.16 «Екологія». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2017.

Вивчено особливості будови, розміру та хімічного співвідношення наночастинок, що входять до складу наноагрохімікатів. Обґрунтовано доцільність врахування фізико-хімічних властивостей наночастинок, зокрема їх розмірів, що визначатиме токсичність.

Здійснено вивчення впливу наноагрохімікатів на біологічні системи різних рівнів організації із врахуванням фізико-хімічних характеристик наночастинок, що входять до їх складу.

Визначено найчутливіші біотести для оцінювання токсичності наноагрохімікатів: показники, що характеризують поділ клітин меристематичної тканини (тест із *Allium cepa* L.); морфометричні показники розвитку вищих рослин (біотест крес-салат); показники активності ґрунтових бактерій – мікроорганізмів, що приймають участь у циклі азоту і визначають рівень нітрифікаційної здатності ґрунту; характеристики популяції водних організмів (ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg).

Вдосконалено чинну систему оцінювання показниками, що передбачають врахування особливостей агрохімікатів, до складу яких входять наночастинок. Зокрема, доповнено показники цитотоксичності, характеристиками розміру та

форми наночастинок, що дозволить об'єктивно здійснювати прогноз їх екологічної небезпечності.

Встановлено, що за показниками впливу на біоту водних, ґрунтових та наземних екосистем вищим рівнем токсичності характеризувався препарат Аватар-1 відносно препарату Nano-Gro, що залежало не лише від дози застосування і загального хімічного складу, а і від розміру та форми (геометрії) наночастинок, які входили до їх складу.

**Ключові слова:** наноагрохімікати, наночастинки, нанопрепарат, цитотоксичність, токсичність, екотоксикологічна оцінка.

## АННОТАЦІЯ

**Рудницкая Л. В. Экотоксикологическая оценка агрохимикатов, полученных по нанотехнологиям. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата сельскохозяйственных наук по специальности 03.00.16 «Экология». – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена актуальному на сегодня вопросу изучения особенностей влияния наноагрохимикатов на биологические системы разных уровней организации с целью разработки научных основ их экотоксикологического оценивания.

Изучив и систематизировав данные отечественных и зарубежных ученых о специфике размерных эффектов наночастиц и их токсичности установлено, что они, в основном, проявляются для наночастиц меньших размеров. В случае с нанопрепаратами, используемыми в растениеводстве, при определении экологического риска нужно учитывать, что специфические физические-химические свойства наночастиц, в частности размер, обуславливают высокую биодоступность и позволяют им вступать в прямой контакт с биосистемой, начиная с молекулярного уровня. Выяснено, что действующая система оценки не предусматривает учета особенностей агрохимикатов, в состав которых входят наночастицы. Поэтому обоснована необходимость разработки научных подходов к экотоксикологической оценке нанопрепаратов, внедрение которой при государственных испытаниях новых видов наноагрохимикатов позволит предупредить возможные негативные воздействия на окружающую среду.

Для понимания механизмов воздействия наночастиц на живые организмы изучены особенности строения, размера и химического состава наночастиц, входящих в состав наноагрохимикатов. Анализ полученных результатов позволил выдвинуть предположение, что Аватар-1 по сравнению с Nano-Gro, будет иметь более высокий уровень токсичности, поскольку характеризуется кристаллическим строением, меньшими размерами наночастиц и содержит в своем составе большее количество биоцидных химических элементов. Таким образом, обоснована целесообразность учета физико-химических свойств наночастиц, которые обуславливают их биологическое действие и определяют токсичность.

Для разработки научных основ экотоксикологической оценки осуществлено изучение влияния наноагрохимикатов на биологические системы

разных уровней организации с учетом физико-химических характеристик наночастиц, входящих в их состав. Установлено, что нанопрепараты индуцируют токсический процесс на различных уровнях организации живого. Сравнение токсичности нанопрепаратов показало, что Аватар-1 более опасен для живых организмов чем Nano-Gro, что может быть связано с размером и строением наночастиц, которые входят в их состав.

Исследованы реакции-отзывы организмов-стенобионтов. По размеру отклонения от контроля: зона оптимума (отклонение не превышает 10 %), зона комфорта (отклонение в пределах 10–25 %), зона пессимума (отклонение превышает 25 %) определены самые чувствительные биотесты для оценки токсичности наноагрохимикатов. Это показатели, характеризующие деление клеток меристематической ткани (тест с *Allium cepa* L.); морфометрические показатели развития высших растений (биотест кресс-салат); показатели активности почвенных бактерий – микроорганизмов, участвующих в цикле азота и определяющих уровень нитрификационной способности почвы; характеристики популяции водных организмов (ракообразных *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg).

Исследования, проведенные на представителях наземной, почвенной и водной подсистемы показали, что развитие токсического процесса под влиянием нанопрепаратов, безусловно, зависел от дозы их применения и определено, что развитие токсического процесса прямопропорционально зависит от дозы применения наноагрохимикатов.

Полевые опыты показали, что наноагрохимикаты, несмотря на невысокие дозы применения (50–100 мг/га), существенно влияют на процессы, протекающие в агроэкосистемах: увеличивают содержание подвижных соединений питательных элементов в пахотном слое почвы, активизируют переход химических веществ из ризосферы к надземным частям растений; повышают продуктивность сельскохозяйственных культур (до 2,0 раз). Показано, что повышение продуктивности сельскохозяйственных растений не всегда сопровождается улучшением качества продукции.

Результаты полевых исследований подтвердили положения относительно положительного влияния нанопрепаратов на урожайность сельскохозяйственных культур. В среднем за 3 года отмечен рост урожайности как озимой пшеницы сорта Бриллиант, так и свеклы сахарной гибрида Настя. Однако лабораторные опыты помогли определить возможные экологические риски от применения нанопрепаратов, которые связаны с наночастицами, входящие в их состав.

Таким образом, усовершенствована действующая система оценивания показателей, предусматривающих учет особенностей агрохимикатов, в состав которых входят наночастицы. Нами предложено учитывать показатели, характеризующие размер и форму наночастиц, а также показатели влияния препарата на процессы, протекающие в клетке и которые обуславливают цитотоксичность нанопрепаратов, что позволит объективно осуществлять прогноз их экологической опасности.

Обоснованно и разработано классификацию наноагрохимикатов по влиянию на природные экосистемы, которая предусматривает их разделение на четыре класса опасности и учитывает физико-химические характеристики наночастиц, цитотоксичность, фитотоксичность, а также традиционные показатели – воздействие на водные, почвенные и наземные организмы.

Установлено, что по показателям воздействия на биоту водных, почвенных и наземных экосистем высоким уровнем токсичности характеризовался препарат Аватар-1 (кристаллического строения с размером НЧ 26–45 нм) относительно препарата Nano-Gro (аморфного строения частиц размером 90 нм), что зависело не только от дозы применения и общего химического состава, но и от размера и формы (геометрии) наночастиц, которые входили в их состав.

**Ключевые слова:** наноагрохимикаты, наночастицы, нанопрепарат, цитотоксичность, токсичность, экотоксикологическая оценка.

### ANNOTATION

**Rudnitska L. V. Ecotoxicological assessment agrochemicals obtained nanotechnology.** – The Manuscript.

Thesis for searching of scientific degree of candidate of agricultural sciences on speciality 03.00.16 Ecology. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The features of the structure, size and value of the chemical nanoparticles that are part nanoagrochemicals. The expediency of consideration of physical and chemical properties of nanoparticles, including their size, which determine toxicity.

Study of nanoagrochemical effect on biological systems at various levels of the organization, taking into account physical and chemical properties of nanoparticles that make up their composition was done.

The most sensitive bioassays for evaluating toxicity nanoagrochemicals: indicators characterizing cell division meristematic tissue (*Allium cepa* L.); morphometric parameters of higher plants (biotest cress-salad); indicators of activity of soil bacteria-microorganisms participating in nitrogen cycle and determine the level of capacity нитрификации почвы; characteristics of the populations of aquatic organisms (crustacean *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg) were determined.

The current system of performance evaluation that takes into consideration characteristics of agrochemicals, which include nanoparticle were Improved. Specifically, supplemented by indicators cytotoxicity characteristics of size and shape of nanoparticles that will objectively carry out their environmental hazard prediction.

It was found that in terms of impact on biota water, soil and terrestrial ecosystems higher level of toxicity was characterized by preparation Avatar-1 regarding drug Nano-Gro, depended not only on the dose of use and overall chemical composition, but also the size and shape (geometry) nanoparticles who were in their composition.

**Keywords:** nanoagrochemicals, nanoparticles, nanopreparat, cytotoxicity, toxicity, ecotoxicological assessment.