

Еуразиялық агротехникалық журнал = Евразийский агротехнический журнал. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2026. -№ 1 (129). - P.-254-261. - ISSN 3135-243X, 3135-2448

doi.org/10.51452/eaj.2026.1(129).2148

ЭОЖ 631.4:620.3

Зерттеу мақаласы

Биофизикалық әдістермен синтезделген нанобөлшектер және оларды өсімдік патогендеріне қарсы қолдануды модельдеу

Мамбаева А.Ш.¹, Саданов А.К.¹, Ондаканов Д.А.¹, Сандыбаева А.М.¹, Лозовицкая Б.²

¹Қыздар ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

²«Өсімдік қорғау» ҒЗИ, Белосток, Польша

Корреспондент автор: Мамбаева А.Ш.: altyn71-71@mail.ru

Бірлескен авторлар: (1: АС) a.sadanov1951@gmail.com; (2: ДО) dastan_vko99@mail.ru

(3: АС) adema.sandybaeva@bk.ru; (4: БЛ) bozena.lozowicka@mail.ru

Қабылданған күні: 12.02.2026 **Қабылданды:** 19.03.03 **Жарияланды:** 30.03.2026

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Наноматериалдар өсімдіктерге төзімділік пен ауруларды бақылауда, қазіргі агротехникалық революцияда мықты құрал болып табылады. Азық-түлікпен қамтамасыз ету мәселелерін заманауи әдістермен шешу тиімділікті арттыруды және олардың адам ағзасына және қоршаған ортаға әсерін тереңірек түсінуді талап етеді. Осыған байланысты биофизикалық әдістермен синтезделген нанобөлшектер өсімдік патогендеріне қарсы баламалы, экологиялық қауіпсіз құрал ретінде зерттеу өзекті. Зерттеудің мақсаты – металл және металл оксидтері нанобөлшектерінің фитопатогендерге қарсы биологиялық белсенділігін бағалау және олардың әсерін математикалық модельдеу.

Материалдар мен әдістер. Мақалада биофизикалық тәсілдер (лазерлік абляция және ультрадыбыстық кавитация) арқылы синтезделген күміс (Ag), мырыш оксиді (ZnO) және мыс оксиді (CuO) негізіндегі нанобөлшектердің өсімдік патогендеріне қарсы биологиялық белсенділігі зерттелді. Нанобөлшектердің морфологиясы, орташа өлшемі мен ζ-потенциалы анықталып, фитопатогенді саңырауқұлақтар мен бактерияларға қарсы тиімділігі зертханалық жағдайда бағаланды. Нәтижелер нанобөлшектердің патогендердің өсуін айтарлықтай тежеу қабілетіне ие екенін және оларды экологиялық қауіпсіз өсімдік қорғау құралдары ретінде қолдануға болатынын көрсетті. Тежеу деңгейінің концентрацияға тәуелділігі экспоненциалды модель арқылы сипатталды.

Нәтижелер. Синтезделген нанобөлшектердің өлшемі 18-32 нм аралығында болды, ζ-потенциалы –27...–32 мВ мәндерін көрсетті, бұл олардың коллоидтық тұрақтылығын дәлелдейді. Ең жоғары антимикробтық әсер күміс нанобөлшектерінде байқалды: *F. oxysporum* – 82 %, *A. solani* – 79 %, *X. campestris* – 88%. Тежеу деңгейі бөлшек өлшемі мен меншікті бетіне тәуелділігін көрсетті. Математикалық модель тәжірибелік деректермен жоғары сәйкестік көрсетті ($R^2 \approx 0,91 - 0,95$) және концентрация 50-100 мг/л аралығында қанығу аймағына өтетінін дәлелдеді.

Қорытынды. Биофизикалық әдістермен алынған металл және металл оксиді нанобөлшектері фитопатогендерге қарсы жоғары тиімділік көрсетті. Ұсынылған экспоненциалды модель нанобөлшек концентрациясы мен биологиялық әсері арасындағы сандық тәуелділікті сипаттап, өсімдік қорғау препараттарының оңтайлы дозасын болжауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелерден нанобөлшектерді экологиялық қауіпсіз өсімдік қорғау құралдары ретінде қолдану қажеттілігін ұсынуға болады.

Кілт сөздер: нанобөлшектер; биофизикалық синтез; фитопатогендер; антимикробтық белсенділік; ауыл шаруашылығы.

Кіріспе

Өсімдік аурулары ауыл шаруашылығы өнімділігінің төмендеуіне әкелетін негізгі биологиялық факторлардың бірі болып табылады. Қазақстан жағдайында фитопатогенді саңырауқұлақтар мен бактериялар (*Fusarium*, *Alternaria*, *Xanthomonas*) дәнді және көкөніс дақылдарына елеулі зиян келтіреді. Қолданыстағы химиялық пестицидтер патогендердің төзімділігін арттырып, қоршаған ортаға экологиялық зиян келтіреді [1].

Осыған байланысты нанотехнологияға негізделген балама қорғау құралдарын әзірлеу өзекті болып отыр. Биофизикалық әдістермен синтезделген нанобөлшектер жоғары антимиқробтық белсенділік көрсетеді. Сонымен қатар олардың фитопатогендерге әсерін математикалық модельдеу нанобөлшек концентрациясы мен тиімділігі арасындағы сандық тәуелділікті анықтауға және өсімдік қорғау препараттарының оңтайлы дозасын болжауға мүмкіндік береді.

Металл және металл оксиді нанобөлшектерінің антимиқробтық әсері бірнеше механизмдер арқылы іске асады: жасуша қабырғасының құрылымдық бұзылуы, мембраналық өткізгіштіктің өзгеруі, реактивті оттегі түрлерінің (ROS) генерациясы және ДНҚ репликациясының тежелуі. Әсіресе күміс нанобөлшектері (AgNPs) иондарын бөлу арқылы ақуыздардың тиол топтарымен әрекеттесіп, ферменттік жүйелердің инактивациясына алып келеді. Мырыш оксиді (ZnONPs) және мыс оксиді (CuONPs) нанобөлшектері фотокаталитикалық белсенділігі арқылы оксидативті стресс тудырады [2, 3].

Материалдар мен әдістер

AgNPs, ZnONPs және CuONPs сұйық ортадағы лазерлік абляция және ультрадыбыстық кавитация әдістерімен синтезделді. Лазерлік абляция Nd:YAG лазерінің ($\lambda = 1064$ нм, импульс ұзақтығы $\tau = 10$ нс) көмегімен деионизацияланған суда жүргізілді. Ультрадыбыстық өңдеу 20 кГц жиілікте, 60 Вт қуатта 30 минут бойы іске асырылды.

Нанобөлшектердің орташа диаметрі лазер импульсінің энергиясына тәуелді (1):

$$D = k^{(E)^{-n}}, \quad (1)$$

мұндағы, D – нанобөлшек диаметрі, нм;

E – лазер импульсінің энергиясы, мДж;

τ – импульс ұзақтығы;

k және n – тәжірибелік коэффициенттер [4, 5].

Зерттеуде келесі фитопатогендер қолданылды:

Fusarium oxysporum – фузариоз қоздырғышы (саңырауқұлақ);

Alternaria solani – альтернариоз қоздырғышы (саңырауқұлақ);

Xanthomonas campestris – ксантомоз қоздырғышы (бактерия).

Алматы облысы, Талғар ауданы егістігінде өсірілген қияр мен қырыққабат дақылдарының тамыр аймағынан(ризосферасынан) топырақ үлгілері алынды. Үлгілер стерильді құралдармен 5-15 см тереңдіктен жинап алынып, зертханаға жеткізілгеннен кейін микробиологиялық талдаулар, оларды қоректік ортада өсірулер жүргізілді. Микроағзаларды бөліп алу үшін сериялық сұйылту әдісі қолданылды, алынған суспензиялар Петри табақшаларында арнайы қоректік ортаға егілді. Саңырауқұлақтарды өсіру үшін картоп-декстрозалы агар (PDA), ал бактерияларда қоректік агар (NA) орталары пайдаланылды. Тежелу деңгейін бақылау 25 ± 1 °C температурада 7 тәулік аралығында жүргізілді.

Нанобөлшектердің тиімділігі агардағы диффузия әдісі және мицелий өсуін тежеу тәсілімен анықталды. Ингибиция пайызы келесі формула бойынша есептелді (2):

$$I = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \times 100\%, \quad (2)$$

мұндағы, D_0 – бақылаудағы колония диаметрі;

D_1 – нанобөлшек қатысындағы диаметр.

Фитопатогендердің өсуін тежеу деңгейін сипаттау үшін эмпирикалық-математикалық модель қолданылды. Ингибиция деңгейінің нанобөлшек концентрациясына тәуелділігі экспоненциалды функциямен сипатталды (3):

$$I(C) = I(1 - e^{-kc}), \quad (3)$$

мұндағы:

$I(C)$ – фитопатогендердің өсуін тежеу пайызы, %;

I_{\max} – максималды ингибиция деңгейі;

k – нанобөлшектің биологиялық тиімділік коэффициенті;

C – нанобөлшек концентрациясы, мг/л.

Модельдеу нәтижелері тәжірибелік деректермен салыстырылып, жоғары сәйкестік көрсетті ($R^2 = 0,91-0,95$) [6, 7].

Экспоненциалды модель биологиялық жүйелердегі қанығу кинетикасына тура келеді. Концентрация артқан сайын рецепторлық немесе мембраналық байланысу аймақтары шектеледі, нәтижесінде ингибиция қисығы плато аймағына өтеді. Бұл құбылыс Михаэлис-Ментен типті кинетикалық заңдылықтарға ұқсас.

Лазерлік абляция кезінде жоғары энергиялы импульстар металл заттың бетінде плазмалық қабат түзеді, оның жылдам суынуы наномөлшерлі кластерлердің түзілуіне әкеледі. Ультрадыбыстық кавитация барысында пайда болатын микрокөпіршіктердің коллапсы локальды қысым мен температураны күрт арттырып, бөлшектердің қайта агрегациялануын тежейді. Бұл екі әдістің үйлесуі тар өлшемді, сфералық және жоғары дисперсті нанобөлшектердің түзілуін қамтамасыз етеді, нәтижесінде олардың биологиялық белсенділігі артады.

Нәтижелер және талқылау

Нәтижелер көрсеткендей биофизикалық әдістермен синтезделген нанобөлшектердің өлшемі 18-32 нм аралығында өзгерді. Күміс нанобөлшектерінің ең кіші орташа өлшемге және ең жоғары меншікті бетке ие болғанын көре аламыз, бұл олардың басқа нанобөлшектермен салыстырғанда реакциялық қабілеті жоғары екенін көрсетеді. Барлық нанобөлшектердің ζ -потенциалы теріс мәндерге ие, бұл коллоидтық жүйелердің салыстырмалы тұрақтылығын дәлелдейді. Биофизикалық ізденісте осыған дейінгі нәтижелер дәлелденіп, расталды. ζ -потенциал мәндерінің -25 мВ-тан төмен болуы коллоидтық жүйенің электростатикалық тұрақтылығын көрсетеді (1-кесте). Теріс зарядталған бөлшектердің өзара тебілуі агрегация процесін баяулатып, ерітіндідегі дисперстілік деңгейін сақтайды. Бұл биологиялық әсердің тұрақтылығына тікелей ықпал етеді [8, 9].

1-кесте – Биофизикалық әдістермен синтезделген нанобөлшектердің негізгі параметрлері

Нанобөлшек	Орташа өлшемі, нм	ζ -потенциал, мВ	Меншікті беті, м ² /г
AgNPs	18 ± 3	-32	45
ZnONPs	32 ± 5	-27	38
CuONPs	25 ± 4	-29	41

Нанобөлшектердің антимикробтық белсенділігі олардың өлшемі мен меншікті бетіне тікелей тәуелді. Бөлшек өлшемі кішірейген сайын беткі атомдардың үлесі артып, реакциялық белсенді орталықтардың саны көбейеді. Бұл реактивті оттегі түрлерінің түзілуін күшейтіп, микроб жасушаларындағы липидтер мен ақуыздардың тотығуын жеделдетеді. Сондықтан AgNPs ең жоғары тежеу деңгейін көрсетуі олардың ең кіші өлшемі мен ең үлкен меншікті бетіне байланысты.

Бақылау барысында фитопатогендердің өсуі тежелмеген (0%), ал нанобөлшектер қолданған жағдайда айқын тежелу байқалған (2-кестеде).

2-кесте – Нанобөлшектердің фитопатогендердің өсуін тежеу тиімділігі, %

Патоген	AgNPs	ZnONPs	CuONPs
<i>Fusarium oxysporum</i>	82 ± 2	68 ± 3	71 ± 2
<i>Alternaria solani</i>	79 ± 3	65 ± 2	69 ± 3
<i>Xanthomonas campestris</i>	88 ± 2	72 ± 3	75 ± 2

Бактерия *Xanthomonas campestris* үшін тежелу деңгейінің жоғары болуы оның жасуша қабырғасының құрылымдық ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Грамтеріс бактериялардың жұқа пептидогликан қабаты нанобөлшектердің өнуіне қолайлы жағдай жасайды. Ал саңырауқұлақтарда хитин мен глюканнан тұратын қалың қабырға салыстырмалы төзімділік береді. Алынған нәтижелер күміс нанобөлшектерінің барлық зерттелген патогендерге қарсы ең жоғары антимикробтық белсенділік көрсететінін дәлелдейді (1, 2-кесте). Бұдан синтез әдісінің тиімділігін және алынған нанобөлшектердің биофизикалық және биомедициналық салада қолдануға жарамдығын көруге болады.

Нанобөлшектер жасуша мембранасының өткізгіштігін бұзып, реактивті оттегі түрлерінің (ROS) түзілуін күшейтеді. Модельдеу нәтижелері нанобөлшек концентрациясы 50-100 мг/л аралығында болғанда фитопатогендердің өсуін тежеу қанығу аймағына өтетінін көрсетті. Реактивті оттегі түрлерінің шамадан тыс түзілуі липидтердің пероксидтік тотығуын индукциялайды, бұл мембраналық тұтастықтың бұзылуына және жасуша ішілік гомеостаздың өзгеруіне әкеледі. Сонымен қатар митохондриялық тыныс алу тізбегінің зақымдануы АТФ синтезін (аденозинтрифосфат) – жасышадағы энергия көзін төмендетеді, нәтижесінде жасуша энергетикалық тапшылыққа ұшырайды.

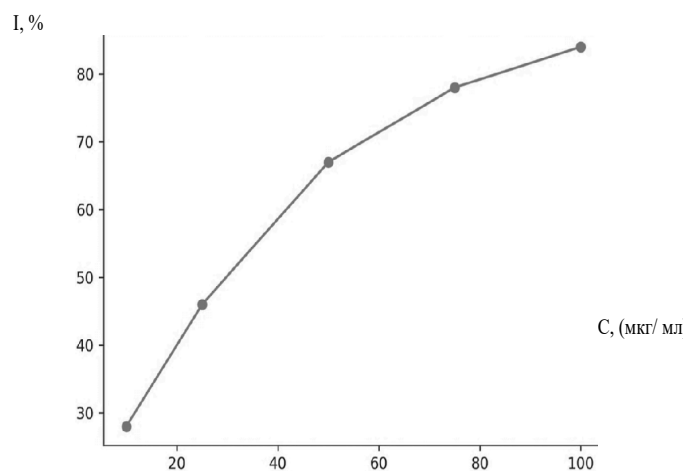
Фитопатогендердің өсуін тежеу деңгейін сандық бағалау мақсатында нанобөлшек концентрациясы мен тежелу деңгейі арасындағы тәуелділік модельденді. Эксперименттік деректер экспоненциалды модельмен жақсы сипатталды, бұл нанобөлшектердің әсері концентрация артқан сайын қанығу аймағына өтетінін көрсетеді [10]. 3-кестеде AgNPs концентрациясына байланысты *Fusarium oxysporum* өсуін тежеу көрсеткіштері көрсетілген

3-кесте – AgNPs концентрациясына байланысты *Fusarium oxysporum* өсуін тежеу көрсеткіштері

Нанобөлшек концентрациясы, мг/л	Тежелу деңгейі, %		
	I- бақылау	II- бақылау	III- бақылау
10	25 ± 2	27 ± 2	28 ± 2
25	40 ± 3	43 ± 3	46 ± 3
50	60 ± 2	62 ± 2	67 ± 2
75	73 ± 2	75 ± 2	78 ± 2
100	81 ± 2	83 ± 2	84 ± 2

Жоғарыдағы кесте нәтижелеріне сәйкес, нанобөлшек концентрациясы 50-100 мг/л аралығында болғанда фитопатогендердің өсуін тежеу деңгейі максимал мәніне жақындайды. Яғни, тәжірибелік нәтижелердің тұрақтылығын көрсетеді [11].

Модельдеу нәтижелері: AgNPs үшін I-C тәуелділігі. C, (мкг/мл)- AgNPs концентрациясы. I, %-тежелу деңгейі (2-сурет).



2-сурет – AgNPs концентрациясы мен фитопатогендердің өсуін тежеу деңгейі арасындағы тәуелділік (I–C)

Суретте күміс нанобөлшектерінің концентрациясы артқан сайын *Fusarium oxysporum* өсуін тежеу пайызының ұлғаюы көрсетілген. Нүктелер эксперименттік деректерді, ал тұтас сызық ингибиция деңгейінің экспоненциалды математикалық модельдеу нәтижесін сипаттайды. Модель тәжірибелік деректермен жоғары сәйкестік көрсетті ($R^2 > 0,9$).

Эксперименттік нәтижелер бойынша AgNPs фитопатогендерге қарсы ең жоғары тежеу деңгейін көрсетті (*F. oxysporum* үшін $82 \pm 2\%$, *X. campestris* үшін $88 \pm 2\%$). Сонымен қатар концентрация 50-100 мг/л аралығында болғанда тежеу деңгейінің қанығу аймағына өтетіні анықталды. Бұл құбылыс ұсынылған экспоненциалды модельмен сипатталып, жоғары сәйкестік коэффициентімен расталды ($R^2=0,91-0,95$). Аталған деректер практикалық қолдану кезінде артық дозалаудың тиімсіз екенін және биологиялық әсердің шекті деңгейі бар екенін көрсетеді.

Нанобөлшектердің ықтимал фитоуыттылығы олардың концентрациясына және әсер ету ұзақтығына тәуелді. Жоғары концентрацияларда металл иондарының бөлінуі өсімдік жасушаларында оксидативті стресс туындатуы мүмкін. Осыған байланысты модельдеу нәтижелері негізінде минималды тиімді концентрацияны анықтау агротехнологиялық регламентті ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл фитопатогендерді тежеу тиімділігін сақтай отырып, өсімдік тіндеріне ықтимал теріс әсерді төмендетуге бағытталған.

Практикалық тұрғыдан нанобөлшектерді тұқымдық материалды өңдеу немесе вегетациялық кезеңде жапыраққа бүрку әдістері арқылы қолдану қарастырылуы мүмкін. Жоғары меншікті беті (AgNPs үшін $45 \text{ м}^2/\text{г}$) және кіші өлшемі ($18 \pm 3 \text{ нм}$) олардың аз мөлшерде тиімді әсер көрсетуіне жағдай жасайды. Бұл ауыл шаруашылығында ресурсты үнемдеу және қоршаған ортаға түсетін химиялық жүктемені азайту тұрғысынан маңызды.

Алынған нәтижелер биофизикалық синтез арқылы алынған нанобөлшектерді өсімдік қорғаудың баламалы құралдары ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Дегенмен, оларды өндірістік деңгейде енгізу алдында далалық жағдайда *in vivo* зерттеулер жүргізу, топырақ микробиоценозына ұзақ мерзімді әсерін бағалау және қауіпсіз қолдану регламентін нақтылау қажет.

Дәстүрлі химиялық пестицидтер бір немесе екі биохимиялық жолды ғана тежейтіндіктен, микроағзаларда төзімділік тез қалыптасады. Ал металл нанобөлшектері мембрананы, ферменттерді және генетикалық аппаратты бір мезетте зақымдайды, сондықтан резистенттілік ықтималдығы едәуір төмен. Сонымен қатар нанобөлшектердің қажетті дозасы бірнеше есе аз, бұл қоршаған ортаға түсетін химиялық жүктемені азайтады.

Қорытынды

Тәжірибемізде биофизикалық синтез арқылы алынған нанобөлшектердің фитопатогендерге әсері математикалық модельмен байланыстырылды. Яғни, AgNPs бактерияға (*Xanthomonas campestris*) қарсы қолдану 88% , ал саңырауқұлаққа (*Fusarium oxysporum*) қарсы 82% тежелу деңгейіне жеткізді. AgNPs концентрациясы 50-100 мг/л аралығында болғанда фитопатогендердің өсуін тежеу деңгейі максимал мәніне жақындады. Бұл жүргізілген жұмыстар өсімдік қорғау препараттарының оңтайлы дозасын алдын ала болжауға мүмкіндік беріп, нанобиотехнологияны агрономиялық практикамен ұштастыруға негіз болады.

Жүргізілген зерттеу металл және металл оксидтері негізіндегі нанобөлшектердің фитопатогендерге қарсы жоғары тиімділік көрсетуі. Эксперименттік нәтижелер математикалық модельдеу арқылы болжам жасалып, нанобөлшектер концентрациясы мен тежелу деңгейі арасындағы байланысын анықтады. Модельдеу өсімдік қорғау құралдарының оңтайлы дозасын алдын ала болжауға мүмкіндік береді.

Авторлардың қосқан үлесі

МА: зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, тәжірибелерді жоспарлау, нанобөлшектерді синтездеу жұмыстарын жүргізу, нәтижелерді талдау, математикалық модельдеу және мақаланың негізгі мәтінін жазу. СА: зертханалық тәжірибелерді ұйымдастыру, фитопатогендермен биосынақтарды жүргізу, микробиологиялық зерттеулерді интерпретациялау және әдістемелік кеңес беру. ОД: нанобөлшектердің физика-химиялық сипаттамаларын анықтау (өлшемі, морфологиясы, ζ -потенциалы), құрал-жабдықтармен жұмыс және деректерді өңдеу. СА, МА: антимикробтық

белсенділікті бағалау, ағардағы диффузия әдістерін жүргізу, ингибиция көрсеткіштерін есептеу және статистикалық талдау. ЛБ: нәтижелерді салыстырмалы талдау, әдебиеттерге шолу жасау, ғылыми редакциялау және қорытынды бөлімін дайындау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасын қарап, мақұлдады және жариялауға келісім берді.

Әдебиеттер тізімі

1 Какимжанова, А.А., и др. (2025). Изучение микромицетов, выделенных из клубней картофеля, пораженных сухой гнилью в Казахстане. *Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени С.Сейфуллина: междисциплинарный*, 3(127), 138-153. DOI:10.51452/kazatu.2025.3(127).2016.

2 Vijayreddy, D., Dutta, P., Puzari, K.R. (2024). Nanotechnology in plant disease management. *Research Biotica*, 5(2), 56-62. DOI:10.54083/ResBio/5.2.2023/56-62.

3 Marco, V.C., et al. (2021). Nanopesticides in Agriculture: Benefits and Challenge in Agricultural Productivity, Toxicological Risks to Human Health and Environment. *Toxicx*, 9(6), 131. DOI:10.3390/toxics9060131.

4 Исакова, Д.Т., Аронбаев, С.Д., Аронбаев, Д.М. (2023). Получение композиционного материала, содержащего наночастицы серебра. *Universum: химия и биология*, 8-1(110).

5 Luciano, P.S., et al. (2017). Silver nanoparticles as antimicrobial agents. *Nanotechnology*, 577-596. DOI:10.1016/B978-0-323-46152-8.00026-3.

6 Sharma, V.K., Yngard, R.A., Lin, Y. (2021). Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 145, 83-96. DOI:10.3390/toxics9060131.

7 Yan, A., et al. (2019). Impacts of Silver Nanoparticles on Plants: A Focus on the Phytotoxicity and Underlying Mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5), 1003. DOI:10.3390/ijms20051003.

8 Антропова, И.Г., Смолянский, А.С., Кошкина, О.А. (2019). Фотобиосинтез гидрозолей наночастиц серебра с использованием экстракта листьев растения *mirtaya paniculata*. *Успехи в химии и химической технологии*, 9(219).

9 Рабинович, Г.Ю., Любимова, Н.А. (2021). Биосинтез наночастиц металлов и оксидов металлов и их использование в качестве компонентов удобрений и препаратов для растениеводства (обзор литературы). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 22(5), 627-640.

10 Зейналов, О.А., Комбарова, С.П., Багров, Д.В., Петросян, М.А., Толибова, Г.Х., Феофанов, А.В., Шайтан, К.В. (2016). О влиянии наночастиц серебра на физиологию живых организмов. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*, 14:1, 25-38. DOI: 10.17816/RCF14125-38.

11 Полонский, В.И., Асанова, А.А. (2018). Влияние Наночастиц серебра на биологические объекты. *Вестник КрасГАУ*, 6.

References

1 Kakimzhanova, A.A., i dr. (2025). Izuchenie mikromicetov, vydelennyh iz klubnei kartofelya, porazhennyh suhoi gnil'ju v Kazahstane. *Vestnik nauki Kazahskogo agrotehnicheskogo issledovatel'skogo universiteta imeni S.Seifullina: mezhdisciplinarnyi*, 3(127), 138-153. DOI:10.51452/kazatu.2025.3(127).2016.

2 Vijayreddy, D., Dutta, P., Puzari, K.R. (2024). Nanotechnology in plant disease management. *Research Biotica*, 5(2), 56-62. DOI:10.54083/ResBio/5.2.2023/56-62.

3 Marco, V.C., et al. (2021). Nanopesticides in Agriculture: Benefits and Challenge in Agricultural Productivity, Toxicological Risks to Human Health and Environment. *Toxicx*, 9(6), 131. DOI:10.3390/toxics9060131.

4 Isakova, D.T., Aronbaev, S.D., Aronbaev, D.M. (2023). Poluchenie kompozitsionnogo materiala, soderzhashhego nanochasticy serebra. *Universum: химия и биология*, 8-1(110).

5 Luciano, P.S., et al. (2017). Silver nanoparticles as antimicrobial agents. *Nanotechnology*, 577-596. DOI:10.1016/B978-0-323-46152-8.00026-3.

6 Sharma, V.K., Yngard, R.A., Lin, Y. (2021). Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 145, 83-96. DOI:10.3390/toxics9060131.

7 Yan, A., et al. (2019). Impacts of Silver Nanoparticles on Plants: A Focus on the Phytotoxicity and Underlying Mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5), 1003. DOI:10.3390/ijms20051003.

8 Antropova, I.G., Smoljanskii, A.S., Koshkina, O.A. (2019). Fotobiosintez gidrozolei nanochastic serebra s ispol'zovaniem ekstrakta list'ev rasteniya murraya paniculata. *Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii*, 9(219).

9 Rabinovich, G.Ju., Lyubimova, N.A. (2021). Biosintez nanochastic metallov i oksidov metallov i ih ispol'zovanie v kachestve komponentov udobrenii i preparatov dlya rastenievodstva (obzor literatury). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 22(5), 627-640.

10 Zeinalov, O.A., Kombarova, S.P., Bagrov, D.V., Petrosyan, M.A., Tolibova, G.H., Feofanov, A.V., Shaïtan, K.V. (2016). O vliyaniï nanochastic serebra na fiziologiyu zhivyh organizmov. *Obzory po klinicheskoi farmakologii i lekarstvennoi terapii*, 14:1, 25-38. DOI: 10.17816/RCF14125-38.

11 Polonskii, V.I., Asanova, A.A. (2018). Vliyanie Nanochastic serebra na biologicheskie ob#ekty. *Vestnik KrasGAU*, 6.

Наночастицы, синтезированные биофизическими методами, и моделирование их применения против патогенов растений

Мамбаева А.Ш., Саданов А.К., Ондаканов Д.А., Сандибаева А.М., Лозовицкая Б.

Аннотация

Предпосылки и цель. Наноматериалы являются мощным инструментом повышения устойчивости растений и борьбы с болезнями в условиях современной агротехнической революции. Решение проблем обеспечения продовольствием современными методами требует повышения эффективности и более глубокого понимания их воздействия на организм человека и окружающую среду. В связи с этим актуально изучение наночастиц, синтезированных биофизическими методами, как альтернативного, экологически безопасного средства борьбы с фитопатогенами. Цель исследования – оценка биологической активности металлов и наночастиц оксидов металлов в отношении фитопатогенов и математическое моделирование их действия.

Материалы и методы. В статье изучена биологическая активность наночастиц на основе серебра с(Ag), оксидов цинка (ZnO) и оксида меди (CuO), синтезированных биофизическими методами (лазерная абляция и ультразвуковая кавитация) против фитопатогенов растений. Определены морфология, средний размер и ζ-потенциал наночастиц, оценена их эффективность против фитопатогенных грибов и бактерий в лабораторных условиях. Результаты показали, что наночастицы обладают способностью существенно подавлять рост болезнетворных микроорганизмов и могут использоваться в качестве экологически безопасных средств защиты растений. Зависимость уровня ингибирования от концентрации описывалась экспоненциальной моделью.

Результаты. Размер синтезированных наночастиц находился в диапазоне 18-32 нм, ζ-потенциал показал значения –27...–32 мВ, что доказывает их коллоидную стабильность. Наибольший антимикробный эффект наблюдался у наночастиц серебра: *F. oxysporum* - 82%, *A. solani* - 79%, *X. Campestris* - 88%. Установлено, что уровень ингибирования зависит от размера частиц и удельной площади поверхности. Математическая модель показала высокое согласие с экспериментальными данными ($R^2 \approx 0,91-0,95$) и доказала, что концентрация достигает зоны насыщения в диапазоне 50-100 мг/л.

Закключение. Наночастицы металлов и оксидов металлов, полученные биофизическими методами, показали высокую эффективность против фитопатогенов. Предложенная экспоненциальная модель описывает количественную зависимость между концентрацией

наночастиц и биологическим эффектом и позволяет прогнозировать оптимальную дозу препаратов защиты растений. Полученные результаты закладывают научную основу использования наночастиц в качестве экологически безопасных средств защиты растений.

Ключевые слова: наночастицы; биофизический синтез; фитопатогены; антимикробная активность; сельское хозяйство.

Nanoparticles synthesized by biophysical methods and modeling their use against plant pathogens

Altynay Sh. Mambaeva, Amankeldi K. Sadanov, Dastan A. Ondakanov, Ádemi M. Sandybayeva
Bozena Lozowicka

Abstract

Background and Aim. Nanomaterials represent a powerful approach for enhancing plant resistance and combating diseases in the modern agricultural revolution. Addressing food supply problems incorporating modern methods requires increased efficiency and a deeper understanding of their impact on the human body and the environment. In this context, nanoparticles synthesized via biophysical methods warrant investigation as environmentally sustainable alternatives for controlling phytopathogens. The purpose of the study is to evaluate the biological activity of metals and metal oxide nanoparticles against phytopathogens and mathematical modeling of their action.

Materials and methods. The study investigates the biological activity of nanoparticles based on silver (Ag), zinc oxide (ZnO) and copper oxide (CuO), synthesized by biophysical methods (laser ablation and ultrasonic cavitation) against plant pathogens. The morphology, average size and ζ -potential of nanoparticles were determined, and their effectiveness against phytopathogenic fungi and bacteria in laboratory conditions were characterized. The results demonstrate that nanoparticles have the ability to significantly inhibit the growth of pathogens and may serve as environmentally friendly plant protection products. The dependence of the level of inhibition on concentration was described using an exponential model.

Results. The size of the synthesized nanoparticles was in the range of 18-32 nm, the ζ -potential showed values of $-27 \dots -32$ mV, which proves their colloidal stability. The greatest antimicrobial effect was observed for silver nanoparticles: *F. oxysporum* - 82%, *A. solani* - 79%, *X. campestris* - 88%. The level of inhibition was found to depend on particle size and specific surface area. The mathematical model showed high agreement with the experimental data ($R^2 \approx 0.91-0.95$) and proved that the concentration reaches the saturation zone in the range of 50-100 mg/l.

Conclusion. Nanoparticles of metals and metal oxides synthesized by biophysical methods have shown high efficiency against phytopathogens. The proposed exponential model describes the quantitative relationship between the concentration of nanoparticles and the biological effect and allows us to predict the optimal dose of plant protection drugs. The results obtained lay the scientific basis for the use of nanoparticles as environmentally friendly plant protection products.

Keywords: nanoparticles; biophysical synthesis; phytopathogens; antimicrobial activity; agriculture.