


БІОТЕХНОЛОГІЯ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 620.3:577.1:579.61-032.4

Синтез нових біотехнологічних наногібридів селену та оцінювання ризику бактерій із мультирезистентністю: огляд літератури

Цехмістренко О.С. 

Білоцерківський національний аграрний університет

 Цехмістренко О.С. E-mail: Tsekhmistrenko-oksana@ukr.net

Цехмістренко О.С. Синтез нових біотехнологічних наногібридів селену та оцінювання ризику бактерій із мультирезистентністю: огляд літератури. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2024. № 2. С. 58–67.

Tsekhmistrenko O. Synthesis of new biotechnological selenium nanohybrids and risk assessment of bacteria with multi-resistance. «Animal Husbandry Products Production and Processing», 2024. № 2. PP. 58–67.

Рукопис отримано: 01.10.2024 р.

Прийнято: 15.10.2024 р.

Затверджено до друку: 28.11.2024 р.

doi: 10.33245/2310-9289-2024-190-2-58-67

Значною медичною та ветеринарною проблемою є поширеність резистентності до антибіотиків, адже бактерії швидко розвивають адаптивні механізми як засіб протидії ефектам традиційних ліків. Надмірний вплив антибіотиків і розвиток механізмів резистентності до антибактеріальних агентів спровокували розповсюдження стійких до антибіотиків бактерій. Наразі докладаються значні зусилля для протидії проліферації резистентних штамів шляхом ідентифікації бактерій, здатних синтезувати антибіотики, відкриваються нові хімічні варіації у їх рецептурах, природні антибіотики поєднуються з раніше невідомими природними джерелами антибіотиків. Значну увагу привертають бактеріоцини молочнокислих бактерій, пептиди або білки із антибактеріальними властивостями. Селен є життєво важливим мікроелементом для підтримки здоров'я та сприяння росту, який можна синергетично використовувати з пероральною терапією антибіотиками та як важливий складовий компонент раціону, а наночастинки селену (SeNPs) мають антиоксидантні, протипухлинні, антибактеріальні властивості та значну антибактеріальну ефективність. Отже, метою роботи було дослідити літературні дані щодо методів екстракції та очищення ентероцину, хімічного синтезу наногібридів у селену, провести їх характеристику за допомогою різних методів та оцінювання їх біологічної активності.

Проведений аналіз даних літератури підтвердив виробництво селену в його хімічно чистому стані. Продемонстроване негативне значення дзета-потенціалу наночастинок Se, що сприяє їх електричній стабільності та здатності до рівномірного розподілу у розчинах без утворення агрегатів або осадів. За утворення наногібридів після додавання білка спостерігається схильність до позитивних значень, що вказує на помітний вплив білка на характеристики поверхні SeNP.

Досліджено антибактеріальну активність ентероцину. Встановлено, що ефективність синтезованих наночастинок селену (SeNP) проти досліджуваних бактерій була нижчою, ніж у синтезованого наногібриду. Дослідження антиоксидантної активності наногібридів довело, що наногібриди можуть поглинати вільні радикали в більшому діапазоні, ніж ентероцин окремо.

Таким чином, дані літератури ілюструють посилену антиоксидантну активність наногібриду *in vitro* та кращу антибактеріальну активність щодо бактерій MDR порівняно з одним ентероцином, що свідчить про можливість його використання у різних галузях, зокрема, у харчовій та медичній. У роботі вивчались публікації лише щодо *in vitro* антибактеріальної та антиоксидантної дії ентероцину та наногібридів. Водночас існує необхідність у дослідженнях щодо вивчення додаткових ефектів біоактивності наногібридів як протигрибкових і протипухлинних засобів.

Ключові слова: наночастинки селену, бактерії, антибактеріальна активність, антиоксидант, бактеріоцини.

В останні десятиліття значною медичною та ветеринарною проблемою є поширеність резистентності до антибіотиків, адже бактерії швидко розвивають адаптивні механізми як засіб протидії ефектам традиційних ліків. Бактерії включають групу небезпечних мікроорганізмів, здатних викликати патогенні інфекції [29] та були визнані збудниками трансмісивних хвороб ще з сьомого століття. У 1910 році вперше як антибактеріальний засіб у комерційну мережу надійшов сальварсан, а надалі – налідиксова кислота, макроліди та хлорамфенікол, досягнувши з часом світового використання. Надмірне застосування, нераціональне використання та призначення антибіотиків викликали розвиток резистентності до антибактеріальних препаратів та спровокували розповсюдження стійких до антибіотиків бактерій [36]. З часом докладали значних зусиль для протидії проліферації резистентних штамів шляхом ідентифікації бактерій, здатних синтезувати антибіотики, та відкривали нові хімічні варіації у їх рецептурах. Зокрема, природні антибіотики були поєднані з до того невідомими природними їх джерелами. Задokumentовано антимікробні сполуки як грампозитивних, так і грамнегативних бактерій, зокрема, бактеріоцини, отримані з молочнокислих бактерій. Бактеріоцинами називають речовини білкової природи, яким притаманні антибактеріальні властивості щодо близькоспоріднених організмів. Їх поділяють на три основні класи, властивості яких досить широко розглянуто в сучасній періодиці [9; 50], та, незважаючи на чисельні дослідження щодо бактеріоцинів, їх використання обмежене такими факторами, як вузький антибактеріальний діапазон, сприйнятливість до розпаду протеазами, необхідність використання високої дози та обмежене виробництво. Наразі, враховуючи їх потенційний вплив, галузі біотехнології та нанотехнології значно зацікавлені у їх дослідженні для потреб фармацевтичної та медичної промисловостей. Такий підхід є конструктивним поглядом у майбутнє та потенційно ефективним методом подолання деяких обмежень бактеріоцинів. Використання нанотехнології забезпечує широкий асортимент продукції в біології та медицині [32]. Нанотехнології здобули значне застосування в біологічних областях, зокрема, і тканинній інженерії [44], транспортуванні ліків [41], діагностиці [52], візуалізації [34], проектуванні системи розподілу води [7] і боротьбі з бактеріальними інфекціями [6]. Наночастинки (НЧ) було запропонова-

но як терапевтичне втручання для інфекцій з використанням різноманітних механізмів, здатних ефективно знищувати бактерії в клітинах людини та тварин з порівняно низьким ступенем токсичності [4012; 40]. Селен (Se) є життєво важливим мікроелементом, необхідним для підтримки здоров'я та сприяння росту, який можна синергетично використовувати з пероральною терапією антибіотиками та як важливим складовим компонентом раціону [48]. Нещодавні дослідження показали, що наночастинки селену (SeNPs) мають антиоксидантні [13; 16; 54], протипухлинні [20; 53; 58], антибактеріальні [40; 57] та антибіоплівкові властивості. Нині документально підтверджено, що SeNPs мають значну антибактеріальну ефективність проти патогенних бактерій, дріжджів і грибів [11; 46]. Зелене виробництво наночастинок селену (SeNPs) продемонструвало біологічну корисність, зменшуючи експресію патогенних генів (*hlaA* та *vgrG-1*) в ізолятах *Staphylococcus aureus* та *Klebsiella pneumoniae*. SeNP мають подвійну функцію, блокуючи бактеріальні клітини та цитоплазматичну мембрану та викликаючи пошкодження ДНК [30]. Отже, метою роботи було дослідити літературні дані щодо методів екстракції та очищення ентероцину, хімічного синтезу наногібридів селену, їх характеристику за допомогою різних методів та оцінити їх біологічну активність.

У дослідженнях [9; 19; 39] використовували штам *Enterococcus faecium SMAN-Baghdad* та мультирезистентні бактерії *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus mutans*, *Pseudomonas aeruginosa* та *Acinetobacter baumannii*. Культивування *E. faecium SMAN_Baghdad* здійснювали на чашках з агаром De Man Rogosa та Sharp (MRS), зразки зберігалися при 4° С. Типи ентероцину було передбачено за допомогою повногеномного секвенування *E. faecium SMAN_Baghdad* та визначено амінокислотну послідовність цільового ентероцину (ентеролізину-А) та його тривимірну структуру.

Для добування ентероцину до бульйону додавали чисту культуру дослідного штаму [9] та збагачували 0,1 % цистеїну, 2 % фруктози, глюкози та сахарози, 1 % триптонну та дріжджового екстракту. В аеробному середовищі збагачений бульйон інкубували, центрифугували, щоб виділити рідкий компонент, рідку частину фільтрували за допомогою фільтра 0,22 мкм. Для протидії впливу органічних кислот і підвищення рН до 6,0 залишкову рідину піддавали обробці 1 н розчином NaOH. Для очищення ентероцину відфільтрований

супернатант безперервно перемішували на льоду з додаванням солі сульфату амонію з насиченням 65 %, центрифугували та гранули розчиняли у буферному розчині фосфату калію, довівши рН до 7,0 і концентрації 0,02 М. Суспензію піддавали діалізу з використанням ідентичного буфера для випадання солей в осад. Після діалізу із суспензії виділяли окремі фракції з використанням спектрофотометру для вимірювання абсорбції кожної фракції при довжині хвилі 280 нм. Молекулярну масу бактеріоцину кількісно визначали за допомогою електрофорезу в додецилсульфаті натрію в поліакриламідному гелі (SDS-PAGE) з трис-трициновим буфером, відтак бактеріоцини піддавали електрофорезу на 16 % гелі з використанням білкової драбини з молекулярною масою від 10 до 250 кДа [19; 39]. Розчин цільового ентероцину ліофілізували за допомогою сублімаційної сушарки.

Водний розчин наночастинок селену одержували диспергуванням 100 мл твіну і 60 мг пентагідрату селеніту натрію у 180 мл деіонізованої дистильованої води [9], додавали по краплях 20 мл 56,7 мМ аскорбінової кислоти за ретельного перемішування до повного перетворення іона селену в металевий селен, що було підтверджено зміною кольору від безбарвного до прозоро-червоного. Надалі червоний розчин центрифугували в охолоджувальній центрифугі, отримані гранули додатково перемішували та промивали гарячою водою для видалення надлишків побічних продуктів [19]. Наночастинки селену диспергували та стерилізували УФ-світлом.

Для синтезу наногібриду наночастинки селену диспергують у деіонізованій воді, вливають в розчин ентероцину, додають фосфатний буфер (рН = 6,2), суміш кип'ятять зі зворотним охолодженням та фільтрують [56].

Для характеристики SeNP та наногібридів здійснювали аналіз UV-Vis на спектрометрі в діапазоні довжин хвиль 200–600 нм. Середній діаметр частинок та дзета-потенціал визначали за допомогою аналізу динамічного розсіювання світла (DLS). SeNP та наногібрид аналізували на абсорбцію в спектральному діапазоні 400–4000 см⁻¹. Встановлено [55], що функційні групи сприяють зменшенню та стабілізації утворених наночастинок.

Після осадження наночастинок на вуглецеву плівку використовували енергодисперсний рентгенівський детектор (EDX) [14]. Для оцінювання розмірів, структури та дисперсії SeNP і наногібриду використовували сканувальну електронну мікроскопію (SEM) і трансмісійну електронну мікроскопію (TEM) [1].

Задля оцінювання антибактеріальної активності ентероцину, SeNPs і наногібриду проти мікроорганізмів, стійких до антимікробних препаратів (MDR), використовували попередньо підготовлені *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Streptococcus mutans* і *Staphylococcus aureus* [9; 38].

Для визначення мінімальної інгібувальної концентрації (МІК) наногібриду щодо досліджуваних бактерій використовували експеримент із розведення АБП з подальшим внесенням до бульйону [23].

Структурні взаємодії між потенційно корисним наногібридом та патогенними ізолятами було досліджено за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM) з використанням модифікованого методу [22].

Одночасно готували суміші, що містили 950 мкл 0,135 мМ розчину DPPH у метанолі та 50 мкл різних доз ентероцину та наногібридів у межах від 20 до 100 мкг/мл, щоб кількісно визначити активність поглинання радикалів досліджуваного матеріалу. Таку ж концентрацію аскорбінової кислоти використовували як позитивний контроль. Абсорбцію досліджуваних матеріалів кількісно визначали за допомогою спектрофотометра при довжині хвилі 517 нм [43].

Дані літератури свідчать, що за секвенування повного генома *E. faecium* SMAN_Baghdad ідентифікують три різні форми бактеріоцинів у штамі: ентероцин SE-K4, ентеролизин А та ентероцин L50a&b. Частіше акцентують увагу на очищеному ентеролизині А, молекулярна маса якого 43195,43, складається з 401 амінокислоти з формулою C₁₉₄₆H₂₉₃₇N₅₁₅O₅₈₃S₁₀. Очищення ентероцину включало три стадії: осадження з використанням 65 % амонію, діаліз з відсіченням 3,5 та проходження через іонообмінну колонку (3 × 15 см), заповнену DEAE-целюлозою. Концентрацію білка визначали за допомогою спектрофотометра при 280 нм. За допомогою електрофорезу в додецилсульфаті натрію в поліакриламідному гелі (SDS-PAGE) з трис-трициновим буфером було визначено, що молекулярна маса ентероцину становить майже 43000 кДа.

Дослідження демонструє [9], що шойно підготовлений водний розчин селену має один пік при довжині хвилі 270 нм зі значенням поглинання 0,75, що свідчить про інтенсивне поглинання випромінювання та наявність частинок з активною поверхнею та узгоджується зі значеннями наноселену в інших дослідженнях [18; 45], підтверджуючи достовірність препарату наноселену. Селен

часто не виявляє жодних структурних коливань в інфрачервоному спектрі через те, що коливання його зв'язків вимагає більшої кількості енергії порівняно з енергією інфрачервоного випромінювання [45]. Отже, аналіз селену, отриманого розглянутим методом, дозволить отримати детальну інформацію про склад матеріалів покриття наночастинок, а саме аскорбінової кислоти [3]. Інфрачервоні спектри з перетворенням Фур'є (FTIR) показали смугу при 3417 см⁻¹, яку можна віднести до розтяжних коливань –ОН груп у чотирьох гідроксильних групах, які утворюють аскорбінову кислоту. Крім того, спектри продемонстрували дві чіткі смуги при 2918 і 2848 см⁻¹, які можна віднести до розтяжних коливань аліфатичних зв'язків С-Н. Крім того, смуга при 1622 см⁻¹ пов'язана з коливанням валентності зв'язків С=О в аскорбінової кислоти. Нарешті спектри продемонстрували додаткові смуги при 1381 і 1039 см⁻¹, які були приписані коливанню розтягування зв'язків С-О у спирті і зв'язків С-О в ангідриді. Решту смуг в діапазоні нижче 1000 см⁻¹ було приписано вібрації аліфатичних зв'язків С-Н. Отже, наночастинки селену утворюються шляхом нанесення аскорбінової кислоти як покриття, що слугує дисперсійним агентом для частинок селену, зберігаючи їх нанорозмірну структуру без агрегації. Дифракція рентгенівських променів (XRD) утворює піки, що підтверджують наявність наночастинок селену в гексагональній кристалічній системі [21]. Чистота отриманих наночастинок селену підтверджується відсутністю будь-яких подальших зареєстрованих піків, а середній розмір частинок був визначений як 10,31 нм. З допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM) встановлено розвиток сферичних, однорідних за формою, частинок, розміром від 58 до 80 нм у діаметрі, охоплених неправильними структурами, загальною товщиною не більше 20 нм. Отримані характеристики підтверджують наявність селену як ядра та аскорбінової кислоти як оболонки та стабільність отриманих наночастинок. Попередні дослідження демонстрували, що форма є сферичною, розміром від 35 до 120 нм [33].

Проведений аналіз EDX підтвердив виробництво селену в його хімічно чистому стані. Отримані наночастинки Se мають дзета-потенціал 12,1 мВ. Дзета-потенціал – кількісна оцінка електричних характеристик наночастинок, яка вказує на електричний заряд на поверхні часточок. У дослідженні негативне значення дзета-потенціалу означає негативний

електронний заряд на зовнішній поверхні частинок Se та їх чудову електричну стабільність [28]. Оптимальна електрична стабільність має вирішальне значення в застосуванні препаратів, оскільки вона дозволяє високочарядженим частинкам підтримувати рівномірний розподіл у розчинах без утворення агрегатів або осадів. Значення отриманого негативного дзета-потенціалу узгоджується зі значеннями, задокументованими в літературі для наночастинок селену [24; 26].

За утворення наногібридів після додавання білка з селеном теоретично відбувається зміщення позиції поглинання піку селену з його положення, що і встановлено у дослідженні [9]: для композиту селену з ентероцином (білком) встановлено наявність двох піків при 230 нм і 315 нм, пов'язаних з електронними переходами у ненасичених зв'язках у білку на додаток до переходів в електронній парі в карбонільних групах [49], а також SPR-селену. Оскільки додавання білка зменшило червоне забарвлення селену, відбувається зсув у бік коротших хвиль (блакитний зсув). Тому пік при 230 нм приписують селену, а його зсув від 270 до 230 нм свідчить про його взаємодію з білком. Щодо піку при 315 нм, то він приписується переносу електронів білка. Вимірювання інфрачервоного перетворення Фур'є (FTIR) для перевірки взаємодії білків із селеновими поверхнями виявило смуги при 3408 см⁻¹, що відповідає розтягуванню карбоксильного О-Н коливання на карбоксильному кінці білка та при 3238 см⁻¹, що відповідає амінокінцевим групам білка та вказує на успішну реакцію [24; 27]. Отримана рентгенівська дифракційна картина (XRD) демонструє характерні піки наноселену під кутами, що підтверджують присутність селену в гексагональній кристалічній структурі [32, 37] та піки, що відповідають первинним пікам білка ентероцину. Існування піків в обох матеріалах вказує на значну кристалічність матеріалу та заміщення аскорбінової кислоти ентероцином на поверхні селену. Середній розмір кристала має середній розмір 15,29 нм з наявними неоднорідними структурами сферичної форми та діаметром від 50 до 65 нм. Така структурна характеристика виникає внаслідок інкапсуляції наночастинок селену ентероцином. Ентероцину притаманна амінокислотна полімерна структура, що дозволяє йому існувати у вигляді щільно упакованих частинок з невеликим поділом на поверхні. Дослідження [9] виявили зменшення діаметра порівняно з результатами, отриманими з чистим селеном, що виникає через поєднання

ентероцину, амінокислотного полімеру, із селеном, що призводить до неможливості його безпосереднього виявлення на поверхні, на відміну від аскорбінової кислоти, яка має низьку молекулярну масу. Отже, унікальність цієї структури виникає внаслідок існування ентоцину. Крім того, вимірювання виявили значну пористість матеріалу, що підвищило потенціал композиту як антибактеріального засобу. А це, своєю чергою, пояснюється накопиченням бактерій на поверхні композиту та подальшим обробленням. Вимірювання виявило наявність частинок неправильної сферичної форми, розміром від 11 до 24 нм у діаметрі, які були відокремлені одна від одної. Кульки та інші нерегулярні структури, виявлені за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM), складаються з менших структур, а просторове розділення цих частинок служить доказом існування ентоцину на їх поверхні. Порівняно з ПЕМ-картиною селену, покритого аскорбіновою кислотою, відстані між частинками були більшими. Це явище можна пояснити збільшенням довжини білкових ланцюгів, що сприяє більшому фізичному розділенню між частинками селену. Доказом зв'язування білка з селеном є наявність карбону, сульфору та нітрогену, а також включення сірковмісних амінокислот у структуру ентоцину. Наногібридний аналіз показав зміну дзета-потенціалу SeNP з негативного значення на позитивне $-0,12$ мВ, а діаметр піку в розподілі дзета-потенціалу продемонстрував суттєве збільшення порівняно з діаметром чистих SeNP. Спостережуване зрушення свідчить про більшу схильність до позитивних значень, у такий спосіб вказуючи на помітний вплив білка на характеристики поверхні SeNP. Цей зсув викликаний впровадженням білка ентоцину на поверхню селену.

Білки містять позитивні заряди завдяки включенню в їх структуру аміних терміналів, позитивні заряди яких мають здатність взаємодіяти з початковими негативними зарядами на поверхні SeNP, викликаючи модифікацію коефіцієнта дзета-потенціалу. Білки, що демонструють складну архітектуру, мають здатність взаємодіяти з поверхнею селену таким чином, що змінюють поверхневий заряд молекул, посилюючи спостережувану зміну дзета-потенціалу. Зміна характеристик поверхні безпосередньо впливає на стабільність молекул та їх взаємодію в рідкому середовищі.

Антибактеріальну активність Ентоцину проти *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus mutans*, *Pseudomonas aeruginosa* та

Acinetobacter baumannii оцінювали за допомогою методу дифузії в агар [9]. Середні інгібуючі зони ± 12 мм у діаметрі були виміряні для всіх досліджуваних бактерій без статистично значущої варіації.

Наногібрид виявляв найзначнішу антибактеріальну активність проти *S. aureus* із середньою зоною інгібування ± 35 мм. *P. aeruginosa*, *A. baumannii* та *S. mutans* проявляли середні зони інгібування ± 33 мм, ± 22 мм та ± 20 мм, відповідно. Антибактеріальна ефективність синтезованих наночастинок селену (SeNP) проти досліджуваних бактерій була нижчою, ніж у синтезованого наногібриду. Проти *Acinetobacter baumannii* спостережуваний ефект був більш вираженим із середнім діаметром зони інгібування ± 15 мм. Однак його вплив на інші досліджувані бактерії становив лише ± 9 мм у діаметрі. Дані літератури свідчать, що комбіновані ефекти ентоцину з SeNP були більш статистично значущими, ніж окремі ефекти кожного агента. Статистичний аналіз виявив статично значущі відмінності ($p \leq 0,01$) у впливі трьох матеріалів на ріст кожної досліджуваної бактерії. Крім того, спостерігалися статично значущі відмінності у впливі окремих SeNP і наногібридів на всі досліджувані бактерії. Значення мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) синтезованого наногібриду вказують на те, що він виявляє бактерицидні властивості щодо досліджуваних мікроорганізмів. Показано, що мінімальна інгібуюча концентрація (МІС) проти *S. aureus*, *P. aeruginosa* та *A. baumannii* становила 31,25 мкг / мл, тоді як МІС проти *S. mutans* становила 62,5 мкг / мл. Мінімальна бактерицидна концентрація (МБК) *S. aureus*, *P. aeruginosa* та *A. baumannii* становила 62,5 мкг / мл, але МБК проти *S. mutans* становила 125 мкг / мл. Результати демонструють сильнішу антибактеріальну ефективність наногібриду як проти грамнегативних, так і проти грампозитивних бактерій. Антибактеріальні властивості бактеріоцинів роблять їх перспективними заміниками звичайних антибіотиків у боротьбі з бактеріальними захворюваннями [2]. Обмеження застосування бактеріоцинів як антибактеріальних засобів і консервантів можна пояснити багатьма критеріями, до яких належить дороговартісна природа синтезу бактеріоцинів, їх зворотний зв'язок з харчовими компонентами, зміни хімічних і фізичних характеристик під час різних етапів оброблення їжі, неадекватне відновлення традиційними методами екстракції бактеріоцинів і обмежену ефективність перевірених бактеріоцинів проти

шкідливих бактерій. Нещодавні дослідження демонструють, що шляхом оптимізації умов виробництва, комбінацій різних протимікробних агентів, методів очищення та підходів до технології перешкод можна вирішити певні минулі проблеми, пов'язані з синтезом бактеріоцину [10]. Багатоочікуваним підходом до подолання обмежень цих пептидів є використання нанотехнологій для можливого підвищення ефективності бактеріоцинів [17]. Поточне дослідження мало на меті з'ясувати потенційне використання нанотехнологій для покращення властивостей і біоактивності бактеріоцинів, а, отже, підвищення їх ефективності. Ентеролізін А, білок, який часто отримують з *Enterococcus faecalis*, був виділений із штаму *E. faecium* SMAN_Baghdad для поточного дослідження [37]. Наступний етап включав часткове очищення ентероцину (ентеролізіну А). Виділений ентероцин демонструє антибактеріальні властивості як щодо грампозитивних, так і щодо грамнегативних бактерій. Дослідження [37] свідчить, що ентеролізін А, синтезований *E. faecalis*, має антибактеріальні властивості проти грампозитивних бактерій. Крім того, дослідження [25] показало, що бактеріоцини, отримані з *E. faecium*, ефективно пригнічують проліферацію багатьох шкідливих бактерій, включаючи *S. aureus* і *P. aeruginosa*. Бактеріоцин зазнав деградації через кілька днів, що призвело до помірного підвищення ефективної концентрації, що знижувало активність бактеріоцину. Серед найдосконаліших варіантів нанотехнології мають потенціал вирішити основну частину цих проблем. На підставі висновків [31], наночастинкам притаманна чудова стабільність у біологічних рідинах, а їх велика площа поверхні посилює їх сильні антибактеріальні властивості. Враховуючи ці переваги, варто об'єднати нанопластики з інкапсуляцією бактеріоцину, щоб підвищити їх властивості [31], тому було синтезовано наногібрид, використовуючи екстрагований ентероцин, а потім проведено порівняльний аналіз біоактивних властивостей ентероцину та композицій наночастинок. Відомості про антибактеріальну активність продемонстрували підвищену антибактеріальну ефективність наногібриду порівняно з ентероцином і SeNP окремо. Сучасні результати демонструють, що ентероцин плюс SeNPs можуть мати посилений або синергетичний терапевтичний вплив. Отже, SeNPs мають потенціал для використання як додаткових агентів у клінічному лікуванні певних бактеріальних інфекційних захворювань. У такий спосіб, поточні

висновки підтверджують ідею про здатність SeNP забезпечувати значні антибактеріальні ефекти та можливість використання для підвищення ефективності сучасних антибіотиків, спрямованих на бактерії. Встановлено [51], що антибактеріальну ефективність підвищила комбінація наночастинок золота з бактеріоцинами. В окремому дослідженні об'єднання бактеріоцину (Vas10307) з кон'югатами наночастинок спричинило посилення антиоксидантних і антибактеріальних властивостей [47]. Також встановлено [35], що наночастинки, кон'юговані з убіквіцидином, продемонстрували підвищену антибактеріальну активність порівняно з наночастинами срібла або золота окремо та посилення антибактеріальної ефективності наночастинок селену, коли вони покриваються бактеріальними полісахаридами [56]. Отже, кон'югацію наночастинок з антибактеріальними хімікатами розглядають як перспективну техніку для біологічних застосувань.

Морфологічні характеристики досліджуваних бактерій аналізували за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM) як до, так і після того, як бактерії зазнали впливу наногібриду. Необроблені клітини демонстрували рясний ріст, чітко виражену морфологію та зберігали звичайну структурну цілісність. Однак, структура бактеріальної клітини зазнала значних змін після 24-годинного впливу мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) наногібриду. Коміркові стінки демонстрували деформацію назовні, яка характеризувалася поверхневими складками та деформованими межами. Основним механізмом, за допомогою якого бактеріоцини виявляють свою дію, є стимуляція утворення пор у клітинних мембранах уразливих бактерій, що надає цим сполукам або бактеріостатичні, або бактерицидні властивості. Бактеріоцини II класу [5] пошкоджують механічну цілісність мембрани бактеріальної клітини. Ці результати підтверджують властивості бактеріоцинів класу II [15] і демонструють, що наногібриди інгібують бактерії, руйнують бактеріальну мембрану та полегшують дифузії внутрішнього вмісту. Крім того, дослідження показує, що більша кількість полісахаридів і білків розсіюється за межами клітин після їх взаємодії з SeNP. Феномен витоку білків і полісахаридів був пов'язаний зі змінами проникності мембран і деградацією клітинних стінок [8]. Внаслідок цього наногібридна синергетична дія порушила клітинну стінку, що уможливило витік внутрішніх компонентів клітини.

Антиоксидантна дія ентероцину та наногібридів. Вільний радикал – високореактивна і часто нестабільна хімічна речовина, яка має один неспарений електрон на атомній орбіталі. Вони мають здатність пошкоджувати молекули (ДНК, білки, вуглеводи та ліпіди), діють як окисники та відновники. Ці вільні радикали завдають шкоди клітинам і порушують гомеостаз, атакують найважливіші макромолекули. Вільні радикали та інші активні форми кисню (АФК) можуть надходити як із внутрішніх, так із зовнішніх джерел (метаболічна діяльність і вплив забруднення) [42], постійно утворюються як ферментативними, так і неферментативними процесами в клітинах. Численні захворювання (антеральний склероз, запальні захворювання, деякі злоякісні пухлини, старіння) пов'язані з окисним стресом. Загально визнаним є значний вплив окисного стресу на широкий спектр станів, зокрема, синдром набутого імунodefіциту, емфізему, виразку шлунка, гіпертонію, прееклампсію, неврологічні розлади (м'язова дистрофія, хвороба Паркінсона та хвороба Альцгеймера), алкоголізм, захворювання, пов'язані з курінням, різні типи раку та всі форми запалення (артрит, васкуліт, гломерулонефрит, синдром респіраторних захворювань у дорослих). Надмірний окисний стрес пов'язаний зі змінами в структурі та функціях ліпідів і білків, що може викликати їх окиснення [4]. Сполуки-антиоксиданти слугують бар'єрами для вільних радикалів. Антиоксидантну активність наногібридів оцінювали за допомогою тесту DPPH, і результати показали, що наногібриди можуть поглинати вільні радикали в більшому діапазоні, ніж ентероцин окремо. Ентероцин і наногібриди продемонстрували залежні від концентрації ефекти поглинання без DPPH при різних концентраціях у діапазоні від 20 до 100 мкг/мл. Найбільшу антиоксидантну активність виявили аскорбінова кислота (позитивний контроль), потім – наногібрид та ентероліцин-А. З іншого боку, при 100 мкг/мл здатність поглинати вільні радикали досягла 63,15 %, перевищуючи таку ентероцину (45,09 %), що було нижчим, ніж у позитивного контролю (82,81 %). Статично спостерігалися суттєві відмінності ($P \leq 0,05$) в ефектах ентероцину, наногібриду та аскорбінової кислоти у верхніх трьох концентраціях (100, 80, 60) мкг / мл, тоді як суттєвих відмінностей в ефектах ентероцину та аскорбінової кислоти не було. Наногібрид Se в концентраціях 40 і 20 мкг / мл. Крім того, були значні відмінності ($P \leq 0,05$) у здатності трьох високих концентрацій ентероцину та

наногібриду поглинати радикали; навпаки, позитивний контроль суттєво не різнився за концентрацією.

Висновки. Отже, метою роботи було дослідити літературні дані щодо виділення ентероцину (ентеролізину А) зі штаму *E. faecium SMAN_Baghdad* та синтез наногібриду для посилення біоактивності ентероцину. Наногібрид продемонстрував посилену антиоксидантну активність *in vitro* щодо вільних радикалів DPPH і кращу антибактеріальну активність щодо бактерій MDR порівняно з одним ентероцином. Таким чином, за умови, що цей нанопрепарат проходить ретельне тестування на безпеку перед його використанням, його можна буде надійно використовувати у кількох практичних контекстах, зокрема, харчовій та медичній галузях. У роботі акцентували увагу на публікаціях лише щодо *in vitro* антибактеріальної та антиоксидантної дії ентероцину та наногібридів. Для повного розуміння можливих ефектів варто проводити дослідження щодо вивчення додаткових ефектів біоактивності наногібридів як протигрибкових і протипухлинних засобів.

REFERENCES

1. Abd AL-Qadir, F.A., Al-Abdaly, B.I. (2024). Green Synthesis of Nanocomposite: Based on Eugenol and Metal Oxides. Characterization and Biomedical Applications. Baghdad Science Journal, 21 (9), pp. 2893–2893.
2. Abed, I.J., Ahmed, M.E., MH AL-Shimmary, S. (2021). Rosemary volatile oil as a preservative agent in some canned meat foods. Iraqi Journal of Agricultural Sciences, 52 (1).
3. Abidi, N., Abidi, N. (2021). Introduction to FTIR Microspectroscopy. FTIR Microspectroscopy: Selected Emerging Applications, pp. 1–12.
4. Ahmad, W., Singh, V., Ahmed, S., Nur-e-Alam, M. (2022). A comprehensive study on antibacterial antioxidant and photocatalytic activity of *Achyranthes aspera* mediated biosynthesized Fe₂O₃ nanoparticles. Results in Engineering, Vol. 14.
5. Ahmed, M.E., Al-Shimmary, S.M. (2018). Comparative study between Pure Bacterocin and Vancomycin on Biofilms of MRSA isolated from medical implants. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, 10 (6), pp. 1476–1480.
6. Akhavan, O., Ghaderi, E., Esfandiar, A. (2011). Wrapping bacteria by graphene nanosheets for isolation from environment, reactivation by sonication, and inactivation by near-infrared irradiation. The journal of physical chemistry B, 115 (19), pp. 6279–6288.
7. Ali, Z.H., Al-Fatlawi, A.H. (2023). Efficiency of silver nano particles in removing *Escherichia coli* ATCC 25922 from drinking water distribution pipes. Results in Engineering, Vol. 17.

8. Al-Shamiri, M.M., Wang, J., Zhang, S., Li, P., Odhiambo, W.O., Chen, Y., Han, S. (2023). Probiotic *Lactobacillus* species and their biosurfactants eliminate *Acinetobacter baumannii* biofilm in various manners. *Microbiology Spectrum*, 11 (2).
9. Al-Shimmary, S.M., Al-Thwani, A.N. (2024). Synthesis of Novel Selenium Nanohybrid for Biotechnology and Risk Assessment of Multi-drug Resistance Bacteria. *Results in Engineering*.
10. Al-Shimmary, S.M., Abdulhasan, G.A., Ahmed, M.E. (2020). *Bacillus cereus* in meat products: 16S rRNA phylogenetic tree analysis and antimicrobial investigation of Nisin A, rosemary essential oil and tetracycline. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 14 (4), pp. 1816–1822.
11. Al-Thwani, A.N., Al-Shimmary, S.M. (2024). Selenium Oxide Nanoparticles and Their Antibacterial Applications. *Journal Of AL-Turath University College*, 2 (39).
12. Alzubaidy, M.W.M., Almohaidi, A.M.S., Sultan, A.A., Al-Shimmary, S.M. (2019). Virulence gene of *Pseudomonas aeruginosa* with nanoparticle. In *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, Vol. 2123, no. 1.
13. Amani, H., Habibey, R., Shokri, F., Hajmiresmail, S.J., Akhavan, O., Mashaghi, A., Pazoiki-Toroudi, H. (2019). Selenium nanoparticles for targeted stroke therapy through modulation of inflammatory and metabolic signaling. *Scientific reports*, 9 (1), 6044 p.
14. Awadelkareem, A.M., Al-Shammari, E., Elkhalfifa, A.O., Adnan, M., Siddiqui, A.J., Patel, M., Ashraf, S.A. (2022). Biosynthesized silver nanoparticles from *eruca sativa miller* leaf extract exhibits antibacterial, antioxidant, anti-quorum-sensing, anti-biofilm, and anti-metastatic activities. *Antibiotics*, 11 (7), 853 p.
15. Bafghi, M.H., Ghanipour, F., Nazari, R., Aghaei, S.S., Jafari, P. (2024). Enhancing the Antibacterial Impact of Lipopeptide Extracted from *Bacillus licheniformis* as a Probiotic against MDR *Acinetobacter baumannii*. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 29 (5), 171 p.
16. Bityutskii, V., Oleshko, O., Tsekhmistrenko, S., Melnychenko, O., Tsekhmistrenko O.M., Shulko, O.Y. (2021). The Influence of Various Forms of Selenium on Redox Processes. *Gene Expression of Selenoproteins, Antioxidant Status in Biological Objects*. (In Ukrainian).
17. Bradshaw, J.P. (2003). Cationic antimicrobial peptides: issues for potential clinical use. *BioDrugs*, 17, pp. 233–240.
18. Cavalu, S., Antoniac, I. V., Fritea, L., Mates, I. M., Milea, C., Laslo, V., Mohan, A. (2018). Surface modifications of the titanium mesh for cranio-plasty using selenium nanoparticles coating. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32 (22), pp. 2509–2522.
19. Du, R., Ping, W., Ge, J. (2022). Purification, characterization and mechanism of action of enterocin HDX-2, a novel class IIa bacteriocin produced by *Enterococcus faecium* HDX-2. *Lwt*, Vol. 153.
20. E. Khaledizade, E., Tafvizi, F., Jafari, P. (2024). Anti-breast cancer activity of biosynthesized selenium nanoparticles using *Bacillus coagulans* supernatant. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 82.
21. ElLateefGharib, F.A., Zeid, I.M., Ghazi, S.M., Ahmed, E.Z. (2019). The response of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plants to foliar application of sodium selenate and selenium nanoparticles (SeNPs). *J. Nanomater. Mol. Nanotechnol.*, (4).
22. El-Deeb, B., Al-Talhi, A., Mostafa, N., Abou-assy, R. (2018). Biological synthesis and structural characterization of selenium nanoparticles and assessment of their antimicrobial properties. *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, 45(1), pp. 135–170.
23. Elshikh, M., Ahmed, S., Funston, S., Dunlop, P., McGaw, M., Marchant, R., Banat, I. M. (2016). Resazurin-based 96-well plate microdilution method for the determination of minimum inhibitory concentration of biosurfactants. *Biotechnology letters*, 38, pp. 1015–1019.
24. Gallagher, W. (2009). FTIR analysis of protein structure. *Course manual Chem*, 455 p.
25. Garcia-Vela, S., Guay, L.D., Rahman, M.R.T., Biron, E., Torres, C., Fliss, I. (2024). Antimicrobial activity of synthetic enterocins A, B, P, SEK4, and L50, alone and in combinations, against *Clostridium perfringens*. *International Journal of Molecular Sciences*, 25 (3), 1597 p.
26. Gbassi, G.K., Yolou, F.S., Sarr, S.O., Ateba, P.G., Amin, C.N., Ake, M. (2012). Whey proteins analysis in aqueous medium and in artificial gastric and intestinal fluids. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(4), pp. 1828–1837.
27. Glassford, S.E., Byrne, B., Kazarian, S.G. (2013). Recent applications of ATR FTIR spectroscopy and imaging to proteins. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*. 1834 (12), pp. 2849–2858.
28. K. Kalishwaralal, K., Jeyabharathi, S., Sundar, K., & Muthukumar, A. (2016). A novel one-pot green synthesis of selenium nanoparticles and evaluation of its toxicity in zebrafish embryos. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*. 44 (2), pp. 471–477.
29. Kadhim, Z. H., Ahmed, M. E., Şimşek, I. (2023). Biologically synthesized Copper Nanoparticles from *S. epidermidis* on re-sistant *S. aureus* and cytotoxic assay. *Bionatura*, 8, pp. 1–12.
30. Keshtmand, Z., Khademian, E., Jafroodi, P. P., Abtahi, M. S., Yarak, M. T. (2023). Green synthesis of selenium nanoparticles using *Artemisia chamaemelifolia*: toxicity effects through regulation of gene expression for cancer cells and bacteria. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 36.
31. Lazzari, S., Moscatelli, D., Codari, F., Salmona, M., Morbidelli, M., Diomede, L. (2012). Colloidal stability of polymeric nanoparticles in biological fluids. *Journal of nanoparticle research*, 14, pp. 1–10.
32. Mahesh, B. (2023). A comprehensive review on current trends in greener and sustainable synthesis

of ferrite nanoparticles and their promising applications. *Results in Engineering*, 101702.

33. Moghaddam, N.A., Eskandari, A., Khodadadi, B., Hafezi, Y., Paduvilan, J. K., Yaraki, M.T. (2024). Green synthesis of bimetallic AgZnO Nanoparticles: Synergistic anticancer effects through regulation of gene expression for lung cancer treatment. *Results in Engineering*, 102329.

34. Moradi, S., Akhavan, O., Tayyebi, A., Rahighi, R., Mohammadzadeh, M., Rad, H.S. (2015). Magnetite/dextran-functionalized graphene oxide nanosheets for in vivo positive contrast magnetic resonance imaging. *RSC Advances*, 5 (59), pp. 47529–47537.

35. Morales-Avila, E., Ferro-Flores, G., Ocampo-García, B.E., López-Téllez, G., López-Ortega, J., Rogel-Ayala, D.G., Sánchez-Padilla, D. (2017). Antibacterial efficacy of gold and silver nanoparticles functionalized with the ubiquicidin (29–41) antimicrobial peptide. *Journal of Nanomaterials*, 2017 (1).

36. Morens, D.M., Folkers, G.K., Fauci, A.S. (2008). Emerging infections: a perpetual challenge. *The Lancet infectious diseases*, 8 (11), pp. 710–719.

37. Nilsen, T., Nes, I.F., Holo, H. (2003). Enterolysin A, a cell wall-degrading bacteriocin from *Enterococcus faecalis* LMG 2333. *Applied and environmental microbiology*. 69 (5), pp. 2975–2984.

38. Patel, M., Siddiqui, A. J., Hamadou, W. S., Surti, M., Awadelkareem, A. M., Ashraf, S. A., Adnan, M. (2021). Inhibition of bacterial adhesion and antibiofilm activities of a glycolipid biosurfactant from *Lactobacillus rhamnosus* with its physicochemical and functional properties. *Antibiotics*, 10 (12), 1546 p.

39. Qiao, X., Du, R., Wang, Y.U., Han, Y.E., Zhou, Z. (2020). Purification, characterization and mode of action of enterocin, a novel bacteriocin produced by *Enterococcus faecium* TJUQ1. *International Journal of Biological Macromolecules*, 144, pp. 151–159.

40. Rabiee, N., Ahmadi, S., Akhavan, O., Luque, R. (2022). Silver and gold nanoparticles for antimicrobial purposes against multi-drug resistance bacteria. *Materials*, 15 (5), 1799 p.

41. Rabiee, N., Akhavan, O., Fatahi, Y., Ghadiri, A.M., Kiani, M., Makvandi, P., Lima, E.C. (2022). CaZnO-based nanoghosts for the detection of ssDNA, pCRISPR and recombinant SARS-CoV-2 spike antigen and targeted delivery of doxorubicin. *Chemosphere*, 306.

42. Revathy, R., Sajini, T., Augustine, C., Joseph, N. (2023). Iron-based magnetic nanomaterials: sustainable approaches of synthesis and applications. *Results in Engineering*, 18.

43. Rochín-Medina, J.J., Ramírez-Medina, H.K., Rangel-Peraza, J.G., Pineda-Hidalgo, K.V., Iribe-Arellano, P. (2018). Use of whey as a culture medium for *Bacillus clausii* for the production of protein hydrolysates with antimicrobial and antioxidant activity. *Food Science and Technology International*. 24 (1), pp. 35–42.

44. Saadati, M., Akhavan, O., Fazli, H., Nemati, S., Baharvand, H. (2023). Controlled differentiation of

human neural progenitor cells on molybdenum disulfide/graphene oxide heterojunction scaffolds by photostimulation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15 (3), pp. 3713–3730.

45. Senthamarai, M.D., Hillary, V.E., Rajan, M.R., Ceasar, S.A. (2024). Biosynthesis of selenium nanoparticles and its biological applications: A systematic review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39.

46. Shakibaie, M., Forootanfar, H., Golkari, Y., Mohammadi-Khorsand, T., & Shakibaie, M. R. (2015). Anti-biofilm activity of biogenic selenium nanoparticles and selenium dioxide against clinical isolates of *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Proteus mirabilis*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 29, pp. 235–241.

47. Siddiqui, A.J., Patel, M., Adnan, M., Jahan, S., Saxena, J., Alshahrani, M. M., Ouhtit, A. (2023). Bacteriocin-nanoconjugates (Bac10307-AgNPs) biosynthesized from *Lactobacillus acidophilus*-derived bacteriocins exhibit enhanced and promising biological activities. *Pharmaceutics*, 15 (2), 403 p.

48. Skalickova, S., Milosavljevic, V., Cihalova, K., Horoky, P., Richtera, L., Adam, V. (2017). Selenium nanoparticles as a nutritional supplement. *Nutrition*, 33, pp. 83–90.

49. Stefanescu, R., Brebu, S., Matei, M., Risca, I.M., Surleva, A., Drochioiu, G. (2017). Contribution to casein determination by UV spectrophotometry. *Acta Chem. Iasi*, 25, pp. 112–126.

50. Sulthana, R., Archer, A.C. (2021). Bacteriocin nanoconjugates: Boon to medical and food industry. *Journal of Applied Microbiology*, 131 (3), pp. 1056–1071.

51. Thirumurugan, A., Ramachandran, S., Shiamaala Gowri, A.J.I.F.R.J. (2013). Combined effect of bacteriocin with gold nanoparticles against food spoiling bacteria—an approach for food packaging material preparation. *International Food Research Journal*, 20 (4).

52. Tiwari, R., Gupta, R.P., Singh, V.K., Kumar, A., Rajneesh, Madhukar, P., Kumar, R. (2023). Nanotechnology-based strategies in parasitic disease management: from prevention to diagnosis and treatment. *ACS omega*, 8 (45), pp. 42014–42027.

53. Tsekhmistrenko, O., Bityutskii, V., Tsekhmistrenko, S. (2020). Biological and physiological role and using of selenium compounds in livestock and poultry. (In Ukrainian).

54. Tymoshok, N.O., Demchenko, O.A., Bityutskyy, V.S., Tsekhmistrenko, S. I., Kharchuk, M.S., Tsekhmistrenko, O.S. (2023). Bionanotechnology of Selenite Ions Recovery into Nanoselenium by Probiotic Strains of *Lactobacteria* and Tolerance of *Lactobacteria* to Sodium Selenite. *Microbiological Journal*, 85 (4), pp. 9–20. (In Ukrainian).

55. Vahdati, M., Tohidi Moghadam, T. (2020). Synthesis and characterization of selenium nanoparticles-lysozyme nanohybrid system with synergistic antibacterial properties. *Scientific reports*, 10 (1), 510 p.

56. Xie, M., Gao, M., Yun, Y., Malmsten, M., Rotello, V.M., Zboril, R., Li, R. (2023). Antibacterial nanomaterials: mechanisms, impacts on antimicrobi-

al resistance and design principles. *Angewandte Chemie International Edition*, 62 (17).

57. Tsekhmistrenko, O., Bityutskyi, V., Tsekhmistrenko, S., Kharchyshyn, V. (2020). Use of selenium nanoparticles synthesized using "green" technologies in quail feeding. European dimensions of sustainable development. (In Ukrainian).

58. Tsekhmistrenko, S.I., Bityutsky, V.S., Tsekhmistrenko, O.S., Demchenko, O.A., Tymoshok, N.O., Melnychenko, O.M. (2022). Environmental biotechnology of "green" synthesis of metal nanoparticles, metal oxides, metalloids and their use. (In Ukrainian).

The synthesis of new biotechnological selenium nano hybrids and risk assessment of bacteria with multi-resistance

Tsekhmistrenko O.

The prevalence of antibiotic resistance is a significant medical and veterinary problem, as bacteria rapidly develop adaptive mechanisms to counteract the effects of conventional drugs. Excessive exposure to antibiotics and the development of resistance mechanisms to antibacterial agents have provoked the spread of antibiotic-resistant bacteria. Significant efforts are currently being made to counteract the proliferation of resistant strains by identifying bacteria capable of synthesising antibiotics, discovering new chemical variations in their formulations, and combining natural antibiotics with previously unknown natural sources of antibiotics. Bacteriocins of lactic acid bacteria, peptides or proteins with antibacterial properties, are attracting considerable attention. Selenium is a vital trace element for maintaining health and promoting growth that can be used synergistically with oral antibiotic therapy and as an important component of the diet, and selenium nanoparticles

(SeNPs) have antioxidant, antitumor, antibacterial properties and significant antibacterial efficacy. Thus, the aim of the study was to investigate the literature data on methods of extraction and purification of enterocin, chemical synthesis of selenium nano hybrids, their characterization using various methods, and assessment of their biological activity.

The analysis of literature data confirmed the production of selenium in its chemically pure state. The negative value of the zeta potential of Se nanoparticles was demonstrated, which contributes to their electrical stability and ability to be uniformly distributed in solutions without the formation of aggregates or precipitates. The formation of nano hybrids after the addition of protein shows a tendency to positive values, indicating a significant effect of protein on the surface characteristics of SeNPs.

The antibacterial activity of enterocin was studied. It was established that the effectiveness of synthesized selenium nanoparticles (SeNP) against the studied bacteria was lower than that of the synthesized nano hybrid. The study of the antioxidant activity of nano hybrids showed that nano hybrids can absorb free radicals in a larger range than enterocin alone.

Thus, the literature data illustrate the enhanced antioxidant activity of the nano hybrid *in vitro* and better antibacterial activity against MDR bacteria compared to enterocin alone, which indicates the possibility of its use in various industries, in particular in the food and medical industries. The article studied publications only on the *in vitro* antibacterial and antioxidant effects of enterocin and nano hybrids. At the same time, there is a need for research to study additional effects of the bioactivity of nano hybrids as antifungal and antitumor agents.

Key words: Selenium nanoparticles, bacteria, antibacterial activity, antioxidant, bacteriocins



Copyright: Цехмістренко О.С. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Цехмістренко О.С.

<https://orcid.org/0000-0003-0509-4627>