


УДК 636.087.72

Біологічні методи синтезу наночастинок селену, їх характеристики та властивості

Цехмістренко О.С. 

¹Білоцерківський національний аграрний університет

 tsekhmistrenko-oksana@ukr.net



Цехмістренко О.С. Біологічні методи синтезу наночастинок селену, їх характеристики та властивості. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2020. № 2. С. 6–20.

Cechnistrenko O.S. Biologichni metody syntezu nanochastynok selenu, i'h harakterystyky ta vlastyvoli. Zbirnyk naukovykh prac' «Tehnologija vyrobnyctva i pererobky produkciï tvarynnyctva», 2020. № 2. PP. 6–20.

Рукопис отримано: 10.07.2020р.

Прийнято: 24.07.2020р.

Затверджено до друку: 24.11.2020р.

doi: 10.33245/2310-9289-2020-158-2-6-20

Вступ

Нанотехнології є новітніми технологіями, що впливають на кожну сферу життя [34]. За прогнозами, нанотехнології змінять підходи у відновленні навколишнього середовища [80], змінять медичні послуги внаслідок застосування нових методів аналізу захворювань та профілактики, лікування, доставки ліків та генної терапії [41, 63, 84, 99]. Нанотехнології впливають на забезпечення екологічно сприятливих альтернативних джерел енергії, які є майже невичерпними та не продукують парникових газів на відміну від викопного палива [4]. Використання нанотехнологій підвищує швидкість теплопередачі у фотоелектричних / теплових (PV / T) системах, модифікує структури PV, що

Нанотехнології впливають на кожну сферу життя, змінюють підходи у відновленні навколишнього середовища, впроваджують нові методи аналізу захворювань та профілактики, лікування, доставки ліків та генної терапії, впливають на забезпечення екологічно сприятливих альтернативних джерел енергії, підвищують урожайність сільськогосподарських культур та продуктивність тварин і птиці. Розглянуто фізичні, хімічні, біологічні методи синтезу наночастинок, селену зокрема, їх властивості та чинники, що беруть участь у відновленні йонів металів до наночастинок. Розглянуто обмеження синтезу наночастинок, притаманні біологічному методу (ідентифікація та виділення біоактивного фрагмента, відповідального за біомінералізацію йонів металів, аналіз способів розроблення окремих наночастинок), та чинники, що сприяють інтенсифікації виробництва наночастинок (оптимізація рН, температури, тривалості контакту, ступеня змішування, концентрації солі та зміни загального заряду функціональних органічних молекул на клітинній стінці). Доведено, що ці чинники ще під час синтезу впливають на розмір, морфологію, склад наночастинок та їх ефективність. Підсумовано модель зеленого синтезу з використанням фізико-хімічних засобів та їх біомедичні застосування. Зазначено організми, що використовуються для синтезу NPs – наземні та морські бактерії, бактеріальні позаклітинні полімерні речовини у вигляді біоредуктантів, гриби, дріжджі, водорості, віруси, мікроорганізми. Описано біохімічні способи боротьби мікроорганізмів із токсичністю металів під час синтезу нанопродукції та чинники, що обумовлюють токсичність металів, перетворених на наночастинок (розмір, форма, покривальний агент, щільність наночастинок та тип патогена). Доведено біологічне значення селену та особливості його впливу на організм у нанорозмірній шкалі.

Ключові слова: нанотехнології, наноселен, бактерії, зелений синтез, ферменти.

поліпшує їх характеристики [4]. У сільському господарстві також широко використовують нанотехнологічні методи для підвищення врожайності сільськогосподарських культур [69], підвищення продуктивності тварин та птиці, трансформування біомаси, утворення наноносіїв, дезінфікуючих засобів та проведення біоремедіації [10, 63, 79, 85, 96]. Використання нанотехнологічних методів дає змогу підвищити дохідність, продуктивність та контролювати забруднення довкілля.

Нанотехнології, біонанотехнології: перспективи

Наночастинок металів активно досліджують з біомедичною, біоремедіаційною та біосенсорною метою через їх унікальні властиво-

сті, більше співвідношення площі поверхні до об'єму та вищу ефективність [95], їх синтез біологічним методом – важлива галузь нанобіотехнології [79, 80]. Наразі біологічний синтез має певні обмеження у синтезі наночастинок, основними з яких є всебічне розуміння біотехнологічного синтезу наночастинок [26], ідентифікація та виділення біоактивного фрагмента, відповідального за біомінералізацію йонів металів з використанням біологічних екстрактів, подальший детальний аналіз біохімічного способу розроблення окремих наночастинок [79, 80]. Важливим є розуміння зв'язування активних фрагментів різного біологічного походження з поверхнею наночастинок для забезпечення стабільності, біосумісності [10], контроль розміру та форми наночастинок за їх масштабного виробництва [56, 62]. Культивування наночастинок утруднюється високою вартістю, потребою в енергії, полідисперсністю та низьким виходом наночастинок. Більш рентабельним та стійким до впливу енергії виробництво наночастинок стало б за використання природних активних біомолекул без відновників за кімнатної температури, а виробництво монодисперсних наночастинок з високим виходом – за оптимізації рН, температури, тривалості контакту, ступеня змішування, концентрації солі та зміни загального заряду функціональних молекул [31]. Потребують уточнення і профіль розподілу, кінетика вивільнення, кліренс наноструктур *in vivo* [85], оцінювання біосумісності та біодоступності наноматеріалів [10]. Дослідження процесу ферментації та вивчення біологічних агентів сприятимуть прискоренню процесу рентабельного індивідуального синтезу наноматеріалів.

Методи синтезу наночастинок

Наноматеріалам притаманний феномен розмірного ефекту, що сприяє прояву нових унікальних функцій [56]. Збільшення співвідношення площі поверхні до об'єму збільшує функції та реакційну здатність поверхневих атомів. До складу наночастинок входять декілька атомів чи молекул різного розміру та форми, зокрема сферичної, шаруватої, кластерної, трубчастої чи стрижневої [62]. Особливу увагу звертають на металеві та металоїдні наночастинок через їх каталітичні, фотокаталітичні, абсорбувальні, оптичні, електричні та магнітні застосування [62]. Наночастинок застосовують у різних галузях промисловості [34], де їх використання сприяє розробленню нових матеріалів та оцінювання їх властивостей способом моделювання розміру частинок, морфології та розподілу [7]. Це сприяє прояву їх протимікробної, протипаразової, каталітичної активностей [71,77],

магнітних та оптичних властивостей [46], прискореної взаємодії з іншими молекулами через збільшене співвідношення площі поверхні до об'єму [52] та використанню їх як біохімічних датчиків, каталізаторів, засобів для біоаналізу та доставки ліків [33].

Основними підходами для синтезу наночастинок є нисхідний та висхідний методи [26]. За використання висхідного методу продукт отримують за допомогою поступового збору атомів [36] хімічним або біологічним способом, водночас взаємодія атомів контролюється [2, 20, 21,85, 99].

Нисхідний метод означає подрібнення сипучого матеріалу на дрібні частини з використанням фізичних та хімічних методів [7]. До фізичних методів належать шліфування, фрезерування, термічна абляція та ін. [5, 88], вони є більш затратними та менш продуктивними, ніж хімічні методи [88], до яких належать методи електрохімії, хімічного та фотохімічного відновлення [36]. Хімічні методи потребують менше енергії для відновлення наночастинок та утворення однорідних за формою та розміром частинок [31], однак є екологічно небезпечними через використання реагентів, які характеризуються канцерогенністю, гено- та цитотоксичністю [49], є нестабільними та менш біосумісними [98]. Превалюючим напрямом досліджень синтезу наночастинок є розроблення екологічно чистого біологічного методу, що моделює розмір, морфологію, стабільність та характеристики наночастинок, є економічно ефективним, простим у використанні і нетоксичним [79, 85]. Мікроорганізми є надзвичайно важливими у цій галузі [26,74, 10]. Після зіткнення з йонами металів мікроорганізми накопичують їх усередині клітини чи на клітинній стінці різними методами (рис. 1), що зумовлює синтез наночастинок [26, 85]. У сфері біологічного синтезу наночастинок бактерії є більш сфокусованими через їх високу стійкість до металів та виживання у жорстких умовах. Розмір і кінцевий вихід виробництва наночастинок можуть бути оптимізовані за допомогою регулювання рН, температури, концентрації субстрату та тривалості впливу субстрату [26, 35, 39, 68].

Біоопосередкований синтез наночастинок використовує бактерії, актиноміцети, гриби, водорості, віруси та дріжджі [1, 19, 21], є нетоксичним, дешевим та надійним методом синтезу наночастинок різних розмірів, форм, складу, структури та фізико-хімічних властивостей [11, 27], дає змогу синтезувати у водному середовищі з мінімальними витратами.



Рис.1. Схема зеленого синтезу наночастинок.

Бактерії перетворюють йони металів у наночастинок, прості у застосуванні, швидко ростуть, ними легко генетично маніпулювати для біомінералізації йонів металів [60, 85]. Бактерії виробили захисні механізми (внутрішньоклітинна секвестрація, зміна концентрації йонів металів, позаклітинне осадження), щоб впоратися із стресовими умовами, спричиненими високими концентраціями металів [72].

Бактерії синтезують наночастинок металів позаклітинними та внутрішньоклітинними механізмами [85, 92], використовуючи NADH-залежну редуктазу, що постачає електрони і сама окиснюється до NAD^+ [92]. Перенесення електронів із NADH зумовлює біологічне відновлення йонів металів. Здатність синтезувати наночастинок металів мають *Bacillus subtilis* [85, 92], *methane-oxidizing bacteria* [18], *Bacillus safensis* [25], *Lactobacillus kimchicus* [39], *Pseudomonas stutzeri* [78], *Herbaspirillum* [90], *Lysinibacillus* [94], *Enterococcus faecalis* [71]. Синтезовані позаклітинно NPs [88] демонстру-

ють властивості поверхневого плазменного резонансу, антибактеріальну активність широкого спектра дії [79], протипухлинну [22, 39] та каталітичну активність [48, 84].

Відновлення йонів металів у наночастинок залежить від багатьох чинників: органічних функціональних молекул на клітинній стінці, що спричиняють біомінералізацію, рН, складу середовища, концентрації солі металу та температури [72]. Ці чинники ще під час синтезу впливають на розмір, морфологію, склад наночастинок та їх ефективність [31].

Для синтезу NPs використовують як наземні бактерії [14, 93], морські бактерії [26], так і бактеріальні позаклітинні полімерні речовини (EPS) у вигляді біоредуктантів [15, 50].

Для синтезу позаклітинних ферментів і вторинних метаболітів зазвичай використовують *Pleurotus ostreatus* [17], які одночасно використовують для синтезу наночастинок завдяки здатності виробляти низку біологічно активних сполук та наявності високого вмісту

білка [1]. Грибковий біосинтез наночастинок є продуктивнішим, порівнюючи із бактеріальним, більш толерантним до металів зі здатністю зв'язувати йони металів із клітинною стінкою біомаси та біоакумулювати їх [28]. На синтез наночастинок, їх розмір та вихід продукції за участі грибів суттєво впливають рН, концентрації солей та тривалість реакції, однак за позаклітинного синтезу грибами не продукуються домішки, зокрема внутрішньоклітинні білки [17]. Гриби *Penicillium citreonigrum*, *Scopulariopsis brumptii* та *Pleurotus ostreatus* здатні синтезувати наночастинок із протираковою, протимікробною активністю [1] та низкою інших сфер застосування [55].

Крім грибів, для біогенного синтезу наночастинок досліджували дріжджі [16,87, 89], які здатні поглинати і накопичувати високі концентрації йонів токсичних металів із довкілля [98], адаптуються до їх токсичності з допомогою біоосадження, хелатування та внутрішньоклітинної секвестрації [3]. Для екологічного позаклітинного біосинтезу NPs використовують *Candida utilis* NCIM 3469 [89], генетично модифіковані дріжджі *Pichia pastoris* [16], *Candida lusitania* [87], *Candida albicans* isolates [55]. Різниця у розмірах, формі та властивостях наночастинок обумовлена різними механізмами, прийнятими дріжджовими клітинами для синтезу і стабілізації наночастинок.

Як і дріжджі, водорості широко застосовують для біосинтезу наночастинок, зокрема *Chlorella vulgaris* [44, 53], *Sargassum bovinum* [66], *Sargassum tenerrimum* та *Turbinaria conoides* [59]. Морські водорості містять біологічно активні сполуки та вторинні метаболіти, які дають змогу їм діяти як нанофабрики та застосовуються як антиоксиданти, протипухлинні, протидіабетичні, кардіо-, гепатопротектори, противірусні препарати [42].

Віруси мають товсте покриття зовнішньої поверхні капсидними білками, які забезпечують платформу для взаємодії з йонами металів [32]. Ці білки можуть утворювати монодисперсні одиниці високої міцності і можуть бути створені з допомогою генної інженерії. Віруси можуть бути модифіковані для осадження матеріалу, цільової доставки ліків [6] чи синтезу нанокон'югатів та нанокомпозитів з металевими наночастинками для медичних потреб. Рослинні віруси безпечні для застосування в нанотехнологіях завдяки своїй структурній та біохімічній стабільності, простому культивуванню, нетоксичності та непатогенності, однак потребують залучення організму-господаря для експресії білка, досі недостатньо розвинути процеси їх синтезу.

Вважають, що біосинтез металевих наночастинок залежить від ферментів та білків редукази, екзополісахариду та хінонів, що переносять електрони [73]. Ферменти та білки, вірогідно, є основним біологічно-активним компонентом, що діє як відновлювальний та обмежувальний агент, а утворення наночастинок є результатом стійкості мікробів до йонів металів. Мікроорганізми для боротьби з токсичністю металів використовують зменшення йонів металів, комплексоутворення, осадження, дисиміляційне окиснення, внутрішньо- та позаклітинні окисно-відновні реакції [85], а у біоредукції металів беруть участь NADH-залежні нітратредуктази [78]. Під час синтезу наночастинок електрони переносяться з допомогою низькомолекулярних окисно-відновних посередників (убіхінол, NAD, кисень/супероксид) чи способом прямої взаємодії між окисно-відновними білками цитохромів с-типу та йоном металу [24].

Бактеріальні екзополісахариди (EPS) являють собою позаклітинно секретовані біомолекули, що здійснюють захист навколишнього середовища, поверхнєве щеплення та міжклітинні взаємодії. EPS здатні відновлювати йони металів для синтезу наночастинок та стабілізувати їх, діючи як закупорювальні засоби [26]. Альдегідні та гемацетальні групи екзополісахаридів діють як біоредуруючі агенти, збільшують ліофільність EPS та безпосередньо впливають на їх взаємодію з іншими полісахаридами та катіонами [9]. Відмічено, щойно йони металів вступають у контакт з EPS, які містять відновні цукри, вони хелатуються, а потім відновлюються і стабілізуються різними функціональними групами.

Перетворення металу в наночастинок зумовлює проблеми з токсичністю на біологічні системи та клітинні компоненти, що залежить від розміру, форми, покривального агента, щільності наночастинок та типу патогена, стосовно якого оцінюється токсичність [12]. Вважають, що цитотоксичність наночастинок створюється за допомогою активних форм кисню (АФК), що призводить до зниження рівня глутатіону та збільшення вільних радикалів [33, 84]. Наночастинок мають більшу площу поверхні, яка забезпечує кращий контакт з мікробами і дає змогу наночастинкам проникати через клітинну мембрану чи прикріплюватись до поверхні клітини залежно від розміру їх частин [31]. Антибактеріальна ефективність наночастинок обернено пропорційна їх розміру [8]. Проблема токсичності наночастинок може бути зменшена їх покриттям біосумісними агентами, що стабілізує їх, запобігає агломерації та робить

придатними для біомедичного застосування через зниження токсичності [12].

Взаємодія наночастинок з мікроорганізмами починається з адгезії наночастинок на стінці мікробної клітини і мембрані [8], значним зниженням дзета-потенціалу клітинної поверхні, надалі наночастинок індукують морфологічні зміни в структурі мембрани, порушують її проникність та дихальні функції способом деполяризації мембрани, що призводить до порушення структури клітини та її загибелі [20]. Унаслідок порушення клітинної структури клітинні компоненти (ферменти, білки, ДНК, метаболіти) починають проникати у навколишнє середовище [20]. NPs можуть взаємодіяти з білками зовнішньої поверхні, утворюють комплекси з киснем, фосфором, азотом чи сіркою, що є донорами електронів, і спричиняти незворотні ушкодження клітинної стінки [23]

Зелений синтез наноселену: переваги нанорозміру

Селен (Se) – металоїдний елемент з різним ступенем окиснення та властивостями у природі, що зустрічається зазвичай у вигляді комплексів із сульфідами чи Ag, Cu, Pb та Ni [45, 82]. Йому притаманні фотолітичні та провідні властивості, елемент застосовується у пестицидах, скляній промисловості, як харчова та кормова добавка [1, 19, 81, 96, 97]. Селен міститься у селенометіоніні, селеноцистеїні та інших ферментах [43, 84], має важливе значення у глутатіонпероксидазній системі [19, 43, 70, 81], яка у поєднанні з вітаміном Е діє як антиоксидант для запобігання шкідливому впливу метаболітів на тканини [65, 70], елемент є важливим для чоловічої фертильності [70], функції імунної системи [67], виробництва нейротрансмітерів [41], профілактики злоякісних новоутворень [1, 11, 77], а його дефіцит призводить до ряду дисфункцій [19, 23, 51, 67, 70].

Для синтезу SeNPs використовували різні методи [7, 17, 24, 95, 77, 94], які довели, що концентрація селеносульфату та температура реакції здійснює значний вплив на морфологію SeNPs [17, 95], цитохром C здатний відновлювати селенат до селену, продукуючи SeNPs [24], а відновлення селену аскорбіновою кислотою за присутності полісахаридів сприяє утворенню стабільних впродовж шести місяців сферичних SeNPs [77].

Наночастинок селену (SeNPs) привертають увагу завдяки своїм протираковим, антиоксидантним, каталітичним, фотокопіювальним та іншим властивостям [40, 48, 80, 96]. Ці властивості для ефективного застосування потребують розроблення синтетичних та зелених способів виробництва SeNP [82, 84, 85]. Нині

підготовка SeNPs значною мірою залежить від хімічних і фізичних методів, які використовують шкідливі хімікати та жорсткі умови реакції, що є основним недоліком і потенційною загрозою для довкілля, здоров'я. На тлі цього біогенний синтез набуває популярності, оскільки є екологічним, дешевим, чистим, безпечним, створює мінімальну кількість відходів. Зелений синтез SeNP використовує рослини [1, 8], частини рослин [21] та мікроорганізми [1, 82, 85], що революціонує їх технологію виготовлення та застосування. Завдяки біосумісності SeNPs широко застосовують у медицині [8, 17, 19], ветеринарії [1, 70], агрономії [74, 91], виробництві сільськогосподарської продукції [10, 43, 81] та інших галузях.

Мікроорганізми мають окисно-відновні системи для використання металів та регулювання їх концентрації, що відбувається через зміну заряду металу мембранною системою транспорту електронів та відновлювальними ферментами. У такий спосіб мікроорганізми регулюють дифузію йонів металів та детоксифікують їх [86]. Селенат метаболізується дисимілярним зниженням вмісту, що провокується елементарним селеном, та асиміляційним зниженням вмісту, що утворює летку форму селену [58, 76]. Дві ґрунтові алотропні форми селену – червона і чорна. Se⁰ у водному розчині – червоний, і за зростання температури понад 45 °С поступово чорніє [18, 61, 90]. Унаслідок дисиміляційних реакцій різні види бактерій утворюють алотропи червоного та чорного кольору, що накопичуються у середовищі [1].

Bacillus cereus BIPC04, завдяки грампозитивній структурі клітинної стінки та спороутворенню, є перспективною для виробництва наночастинок селену. Селенат відновлюється до селеніту та надалі – до елементарного селену [1, 19, 25, 37, 75, 94]. *Bacillus cereus BIPC04* є стійкою до 0,5–37,5 мМ концентрації селеніту натрію без пригнічення росту бактерій та лише за 75 мМ концентрації пригнічується утворення колоній.

Відомо, що *Pseudomans stutzeri* здатна переносити 2,53 мМ селеніту натрію [78], а максимальна толерантність до селену для *Rhodospirillum rubrum* становить 1,5 мМ [18, 61, 90]. *Bacillus sp.* здатна відновлювати 20 мМ селенату до селеніту та 2 мМ селеніту до елементарного селену з більшою швидкістю відновлення селенату [38]. 6 мМ селеніту з його відновленням до Se⁰ може використати *Ralstonia metallidurans*, а *Enterobacter taylorae* продукує до 500–5000 мкг/л селенату, у такий спосіб знижуючи його кількість впродовж п'яти днів на 81–94 % [28].

B. cereus BIPC04 може переносити та метаболізувати вищі концентрації селенату, аніж інші бактерії [56], та навіть утворювати спори, що можна вважати перевагою, адже *Pseudomonas aeruginosa SNT1* спори не утворює, хоча здатна рости за концентрації селенату 50 мг/л [1]. *B. cereus BIPC04* [56] утворює гексагональні структури без аморфних форм та високою кристалізацією наночастинок, менше проявлялись симетричні та сферичні наночастинок. За зміни параметрів росту *B. cereus BIPC04* продукує внутрішньоклітинні сферичні наночастинок Se з середнім діаметром 170 нм, стабільні навіть без стабілізатора та після введення шурам, що має значення в медицині та виробництві фармацевтичної продукції.

Наночастинок внутрішньоклітинного селену розміром 142–255 нм було отримано за використання *Bacillus sp. Msh1*, з одночасним утворенням сферичних наночастинок розміром 80–220 [37]. Створені сферичні (150 нм) наночастинок селену за використання *Thaueraselenatis* [25] та *B. cereus CM100B* синтезують внутрішньо- та позаклітинні наночастинок селену з діаметром 150–200 нм [94]. Відомо, що *Shewanella sp. HN-41* здатна відновлювати селен (IV) під час дихання з утворенням наночастинок селену розміром 164–181 нм [75].

Швидкість поглинання SeNPs упродовж першої доби та його екскреція упродовж другої вища, ніж об'ємного селену, тому наноселен має меншу токсичність, що дає змогу зменшити дозування ін'єкційних препаратів селену та зменшити спровоковані препаратом ушкодження печінки та нирок. Селеніт підвищує активність сироваткових АЛАТ та АСАТ, активує активність каталази та СОД, не впливаючи на самі ферменти [64, 83]. Селеніт також підвищує вміст малонового діальдегіду в печінці, водночас SeNPs його знижують [64], однак і селеніт, і SeNPs спричиняють однаковий вплив на активність глутатіонпероксидази. Під час вивчення токсичності селеновмісних препаратів у мишей встановлено, що максимальне накопичення елемента відбувається у печінці та селезінці [30], та висловлено припущення [11, 54], що селен, як і Sn, максимально накопичується у кістках, печінці та селезінці.

Nano-Se має низьку токсичність [22], високу біодоступність [57] та антиоксидантну активність [83, 99], є кофактором у складі селенопротеїдів. SeNPs проявляють вищу протипухлинну активність [1, 29], порівнюючи з органічними та неорганічними об'ємними аналогами селену, що дає змогу їх використовувати як терапевтичний і протипухлинний агент

[27], та позитивно впливають на метаболізм щитоподібної залози [46, 47].

SeNPs проявляють антибактеріальну активність щодо росту грамнегативних (*E. coli*) та грампозитивних (*S. aureus*) бактерій [71], протимікробну активність щодо *Escherichia coli*, *Klebsiella sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Staphylococcus aureus* та *Proteus sp.* [48], протигрибкову та фунгіцидну активність щодо *P. digitatum* та *C. coccodes* [55].

Отже, встановлено, що наночастинок селену є потужними та функціонально спроможними в багатьох аспектах життя, синтезуються фізичними, хімічними, біологічними методами. Розглянуто екологічно чисті та менш токсичні методи зеленого синтезу наночастинок. Обговорено розмір, властивості наночастинок, чинники, що впливають на їх синтез, біомолекули, вторинні метаболіти та коферменти, що відновлюють йони металів до наночастинок. Підсумовано модель зеленого синтезу з використанням фізико-хімічних засобів та їх біомедичні застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Abbas H., Abou Baker D. Biological Evaluation of Selenium Nanoparticles biosynthesized by *Fusarium semitectum* as antimicrobial and anticancer agents. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020. 63(4). P. 18–19. Doi: <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.15618.1945>
2. Combined mechanochemical/thermal annealing approach for the synthesis of Co 9 Se 8 with potential optical properties / Achimovičová M. et al. *Applied Physics A*. 2019. 125(1). 8 p. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2305-y>
3. Adelere I. A., Lateef A. A novel approach to the green synthesis of metallic nanoparticles: the use of agro-wastes, enzymes, and pigments. *Nanotechnology Reviews*. 2016. 5(6). P. 567–587. Doi: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2016-0024>
4. Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review / M. H. Ahmadi et al. *International Journal of Energy Research*. 2019. 43(4). P. 1387–1410. Doi: <https://doi.org/10.1002/er.4282>
5. Synthesis and characterization of nano selenium using plant biomolecules and their potential applications / H. Alam et al. *Bio Nano Science*. 2019. 9(1). P. 96–104. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12668-018-0569-5>
6. Enhanced anti-tumor efficacy and reduced cardiotoxicity of doxorubicin delivered in a novel plant virus nanoparticle / E. Alemzadeh et al. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. (2019). 174. P. 80–86. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.11.008>
7. Degradation of diclofenac sodium using UV/biogenic selenium nanoparticles/H₂O₂: Optimization of process parameters / A. Ameri et al. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2020. Vol. 392. 112382. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112382>
8. Anchana R. S., Arivarasu L., Rajeshkumar S. Green synthesis of garlic oil-mediated selenium nanoparticles and its antimicrobial and cytotoxic activity. *Drug Invention Today*. 2020. 14(2).

9. Banerjee A., Gupta P., Nigam V., Bandopadhyay R. Bacterial xopolysaccharides from extreme marine habitat of Southern Ocean: Production and partial characterization. *Gayana*. 2019. 83(2). P. 126–134. Doi:<https://doi.org/10.4067/S0717-65382019000200126>
10. Effects of different dietary selenium sources including probiotics mixture on growth performance, feed utilization and serum biochemical profile of quails / V. Bityutskyy et al. In *Modern Development Paths of Agricultural Production* Springer. Cham. 2019. P. 623–632. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_61
11. Cardarelli N. F. Tin as a vital nutrient: implications in cancer prophylaxis and other physiological processes. CRC press. 2019. Doi:<https://doi.org/10.1201/9780429280511>
12. Chandra H., Kumari P., Bontempi E., Yadav S. Medicinal plants: Treasure trove for green synthesis of metallic nanoparticles and their biomedical applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020. P. 1015–1018. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101518>
13. Cruz L.Y., Wang D., Liu J. Biosynthesis of selenium nanoparticles, characterization and X-ray induced radiotherapy for the treatment of lung cancer with interstitial lung disease. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2019. 191. P. 123–127. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.12.008>
14. Daphedar A., Taranath T. C. Green synthesis of zinc nanoparticles using leaf extract of *Albizia saman* (Jacq.) Merr. and their effect on root meristems of *Drimys indica* (Roxb.) Jessop. *Caryologia*. 2018. 71(2). P. 93–102. Doi:<https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1437980>
15. Decho A.W., Gutierrez T. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. *Frontiers in microbiology*. 2017. 8. 922 p. Doi:<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00922>
16. Elahian F., Reisi S., Shahidi A., Mirzaei S.A. High-throughput bioaccumulation, biotransformation, and production of silver and selenium nanoparticles using genetically engineered *Pichia pastoris*. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2017. 13(3). P. 853–861. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.10.009>
17. Factorial design-optimized and gamma irradiation-assisted fabrication of selenium nanoparticles by chitosan and *Pleurotus ostreatus* fermented fenugreek for a vigorous in vitro effect against carcinoma cells / A.I. El-Batal et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.210>
18. Methyl selenol as a precursor in selenite reduction to Se/S species by methane-oxidizing bacteria / A.S. Eswayah et al. *Applied and environmental microbiology*. 2019. 85(22). Doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.01379-19>
19. Selenium Ameliorates AFB 1– Induced Excess Apoptosis in Chicken Splenocytes Through Death Receptor and Endoplasmic Reticulum Pathways / J. Fang et al. *Biological trace element research*. 2019. 187(1). P. 273–280. Doi:<https://doi.org/10.1007/s12011-018-1361-7>
20. Fardsadegh B., Jafarizadeh-Malmiri H. Aloe vera leaf extract mediated green synthesis of selenium nanoparticles and assessment of their in vitro antimicrobial activity against spoilage fungi and pathogenic bacteria strains. *Green Processing and Synthesis*. 2019. 8(1). P. 399–407. Doi:<https://doi.org/10.1515/gps-2019-0007>
21. Biosynthesis, characterization and antimicrobial activities assessment of fabricated selenium nanoparticles using *Pelargonium zonale* leaf extract / B. Fardsadegh et al. *Green Processing and Synthesis*. 2019. 8(1). P. 191–198. Doi:<https://doi.org/10.1515/gps-2018-0060>
22. Association of selenoprotein and selenium pathway genotypes with risk of colorectal cancer and interaction with selenium status / V. Fedirko et al. *Nutrients*. 2019. 11(4). 935 p. Doi:<https://doi.org/10.3390/nu11040935>
23. Fenech, M. (2020). The Role of Nutrition in DNA Replication, DNA Damage Prevention and DNA Repair. In *Principles of Nutrigenetics and Nutrigenomics* (pp. 27–32). Academic Press. Doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804572-5.00004-5>
24. Fernandes A.P.N. Living capacitors: functional characterization of a novel cytochrome acting as a nanowire. 2019. URL:<http://hdl.handle.net/10362/91579>
25. *Bacillus safensis* JG-B5T affects the fate of selenium by extracellular production of colloiddally less stable selenium nanoparticles / S. Fischer et al. *Journal of hazardous materials*. 2020. 384. 121146. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121146>
26. Gahlawat G., Choudhury A. R. A review on the biosynthesis of metal and metal salt nanoparticles by microbes. *RSC advances*. 2019. 9(23). P. 12944–12967. Doi:<https://doi.org/10.1039/C8RA10483B>
27. Preparation, physicochemical characterization, and anti-proliferation of selenium nanoparticles stabilized by *Polyporus umbellatus* polysaccharide / X. Gao et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. (2020). 152. P. 605–615. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.199>
28. Prokaryotic and Eukaryotic Microbes: Potential Tools for Detoxification and Bioavailability of Metalloids / N. Garg et al. *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*. 2020. P. 149–183. Doi:<https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch9>
29. Habibi G., Aleyasin Y. Green synthesis of Se nanoparticles and its effect on salt tolerance of barley plants. *Int. J. Nano Dimens*. 2020. 11(2). P. 145–157.
30. Subacute oral toxicity investigation of selenium nanoparticles and selenite in rats / N. Hadrup et al. *Drug and chemical toxicology*. 2019. 42(1). P. 76–83. Doi:<https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1491589>
31. Hao N., Li L., Tang F. Roles of particle size, shape and surface chemistry of mesoporous silica nanomaterials on biological systems. *International Materials Reviews*. 2017. 62(2). P. 57–77. Doi:<https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1190118>
32. Chiral plasmonics / M. Hentschel et al. *Science advances*. 2017. 3(5). e1602735. Doi:<https://doi.org/10.1126/sciadv.1602735>
33. Huang Y., Ren J., Qu X. Nanozymes: classification, catalytic mechanisms, activity regulation, and applications. *Chemical reviews*. 2019. 119(6). P. 4357–4412. Doi:<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00672>
34. A Short Review on Role of Nanotechnology in Daily Life / T. Iqbal et al. *Research & Reviews: Journal of Computational Biology*. 2020. 8(3). P. 24–33. URL:<http://medicaljournals.stmjournals.in/index.php/RRJoCB/article/view/1833>

35. Iravani S., Varma R.S. Bacteria in Heavy Metal Remediation and Nanoparticle Biosynthesis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. 8(14). P. 5395–5409. Doi:https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00292
36. Kamali M., Costa M.E.V., Otero-Irurueta G., Capela I. Ultrasonic irradiation as a green production route for coupling crystallinity and high specific surface area in iron nanomaterials. *Journal of cleaner production*. 2019. 211. P. 185–197. Doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.127
37. Biogenic selenium nanoparticles target chronic toxoplasmosis with minimal cytotoxicity in a mouse model / A. Keyhani et al. *Journal of Medical Microbiology*. 2020. 69(1). P. 104–110. Doi:https://doi.org/10.1099/jmm.0.001111
38. Kim H.W., Hong S.H., Choi H. Effect of Nitrate and Perchlorate on Selenate Reduction in a Sequencing Batch Reactor. *Processes*. 2020. 8(3). 344 p. Doi:https://doi.org/10.3390/pr8030344
39. Development of *Lactobacillus kimchicus* DCY51T-mediated gold nanoparticles for delivery of ginsenoside compound K: in vitro photothermal effects and apoptosis detection in cancer cells / Y.J. Kim et al. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*. 2019. 47(1). P. 30–44. Doi:https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1541900
40. Plant Extract Assisted Eco-benevolent Synthesis of Selenium Nanoparticles-A Review on Plant Parts Involved, Characterization and Their Recent Applications / P. Korde et al. *Journal of Chemical Reviews*. 2020. P. 157–168.
41. Kurmi B.D., Patel P., Paliwal R., Paliwal S.R. Molecular approaches for targeted drug delivery towards cancer: A concise review with respect to nanotechnology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020. 101682. Doi:https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101682
42. Liang S. X. T., Wong L. S., Dhanapal A. C. T. A., Djearmane S. Toxicity of Metals and Metallic Nanoparticles on Nutritional Properties of Microalgae. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020. 231(2). 52 p. Doi:https://doi.org/10.1007/s11270-020-4413-5
43. Effect of selenium nanoparticles against abnormal fatty acid metabolism induced by hexavalent chromium in chicken's liver / M. Luo et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. 26(21). P. 21828–21834. Doi:https://doi.org/10.1007/s11356-019-05397-3
44. Majeed M.I., Bhatti H.N., Nawaz H., Kashif M. Nanobiotechnology: Applications of nanomaterials in biological research. Integrating green chemistry and sustainable engineering. 2019. P. 581–615.
45. Selenium oxyanion bioconcentration in natural freshwater periphyton / B. Markwart et al. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2019. 180. P. 693–704. Doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.004
46. McClements J., McClements D.J. Standardization of nanoparticle characterization: methods for testing properties, stability, and functionality of edible nanoparticles. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2016. 56(8). P. 1334–1362. Doi:https://doi.org/10.1080/10408398.2014.970267
47. Mellinas C., Jiménez A., Garrigós M. D. C. Microwave-Assisted Green Synthesis and Antioxidant Activity of Selenium Nanoparticles Using *Theobroma cacao* L. Bean Shell Extract. *Molecules*. 2019. 24(22). 4048 p. Doi:https://doi.org/10.3390/molecules24224048
48. Menon S., KS S.D., Agarwal H., Shanmugam V. K. Efficacy of Biogenic Selenium Nanoparticles from an extract of ginger towards evaluation on anti-microbial and anti-oxidant activities. *Colloid and Interface Science Communications*. 2019. 29. P. 1–8. Doi:https://doi.org/10.1016/j.colcom.2018.12.004
49. Mohanta D., Ahmaruzzaman M. Addressing Nanotoxicity: Green Nanotechnology for a Sustainable Future. *The ELSI Handbook of Nanotechnology: Risk, Safety, ELSI and Commercialization*. 2020. P. 103–112. Doi:https://doi.org/10.1002/9781119592990.ch6
50. Mosallam F. M., El-Sayyad G. S., Fathy R. M., El-Batal A. I. Biomolecules-mediated synthesis of selenium nanoparticles using *Aspergillus oryzae* fermented Lupin extract and gamma radiation for hindering the growth of some multidrug-resistant bacteria and pathogenic fungi. *Microbial pathogenesis*. 2018. 122. P. 108–116. Doi:https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.06.013
51. Mukherjee S., Nethi S. K. Biological Synthesis of Nanoparticles Using Bacteria. In *Nanotechnology for Agriculture*. Springer, Singapore. 2019. P. 37–51.
52. A rapid synthesis and antibacterial property of selenium nanoparticles using egg white lysozyme as a stabilizing agent / S. Muthu et al. *SN Applied Sciences*. 2019. 1(12). 1543 p. Doi:https://doi.org/10.1007/s42452-019-1509-x
53. Mykhaylenko N.F., Zolotareva E. K. The effect of copper and selenium nanocarboxylates on biomass accumulation and photosynthetic energy transduction efficiency of the green algae *Chlorella vulgaris*. *Nanoscale research letters*. 2017. 12(1). 147 p. Doi:https://doi.org/10.1186/s11671-017-1914-2
54. Co-administration of Selenium with Inorganic Mercury Alters the Disposition of Mercuric Ions in Rats / S.E. Orr et al. *Biological trace element research*. 2019. P. 1–9. Doi:https://doi.org/10.1007/s12011-019-01835-y
55. Effect of biogenic selenium nanoparticles on ERG11 and CDR1 gene expression in both fluconazole-resistant and-susceptible *Candida albicans* isolates / N. Parsameher et al. *Current medical mycology*. 2017. 3(3). 16 p. Doi:https://doi.org/10.29252/cmm.3.3.16
56. Pouri S., Motamedi H., Honary S., Kazeminezhad I. Biological synthesis of selenium nanoparticles and evaluation of their bioavailability. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2017. 60 p. Doi:https://doi.org/10.1590/1678-4324-2017160452
57. Preedy V. R. Selenium: Chemistry, Analysis, Function and Effects. Royal Society of Chemistry. 2015.
58. Rahman Z., Singh V.P. Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2020. Doi:https://doi.org/10.1007/s11356-020-08903-0
59. Rajeshkumar S., Veena P., Santhiyaa R. V. Synthesis and Characterization of Selenium Nanoparticles Using Natural Resources and Its Applications. In *Exploring the Realms of Nature for Nanosynthesis*. Springer, Cham. 2018. P. 63–79. Doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-99570-0_4
60. Regulacio M. D., Yang D. P., Ye E. Toward greener methods of producing branched metal nanostructures. *CryStEngComm*. 2020. 22(3). P. 399–411.
61. Rehan M., Alsohim A.S., El-Fadly G., Tisa L. S. Detoxification and reduction of selenite to elemental red selenium by *Frankia*. *Antonie van Leeuwenhoek*. 2019. 112(1). P. 127–139. Doi:https://doi.org/10.1007/s10482-018-1196-4

62. Rentería V., Franco A. Metal Nanoparticles Dispersed in Epoxy Resin: Synthesis, Optical Properties and Applications. In *Reviews in Plasmonics 2017*. Springer, Cham. 2019. P. 191–228. Doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-18834-4_8
63. Lipid Peroxidation In The Body Of Different Species Of Animals And Birds. – 3rd International Conference “Smart Bio”, 02-04 May 2019 / N. Rol et al. Kaunas, Lithuania. 159 p. URL:<http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/4665>
64. Saadi A., Dalir-Naghadeh B., Asri-Rezaei S., Anassori E. Platelet Selenium Indices as Useful Diagnostic Surrogate for Assessment of Selenium Status in Lambs: an Experimental Comparative Study on the Efficacy of Sodium Selenite vs. Selenium Nanoparticles. *Biological Trace Element Research*. 2020. 194(2). P. 401–409. Doi:<https://doi.org/10.1007/s12011-019-01784-6>
65. Sakamoto I. K., Maintiguer S. I., Varesche M.B. A. Phylogenetic characterization and quantification by Most Probable Number of the microbial communities of biomass from the Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor under sulfidogenic conditions. *Acta Scientiarum. Technology*. 2019. 41. 39128 p. Doi:<https://doi.org/10.4025/actascitech-nol.v41i1.39128>
66. Salem S. S., Fouda A. Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: an overview. *Biol Trace Elem Res*. 2020. Doi:<https://doi.org/10.1007/s12011-020-02138-3>.
67. Samsudin A. A., Dalia A. M., Loh T. C., Sazili A. Q. Influence of Bacterial Organic Selenium on Blood Parameters, Immune Response, Selenium Retention and Intestinal Morphology of Broiler Chickens. 2020. Doi:<https://doi.org/10.21203/rs.2.23476/v1>
68. Sardar M., Mazumder J.A. Biomolecules assisted synthesis of metal nanoparticles. In *Environmental Nanotechnology* Springer, Cham. 2019. P. 1–23. Doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-98708-8_1
69. Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review / Y. Shang et al. *Molecules*. 2019. 24(14). 2558 p. Doi:<https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
70. Effects of selenium on the proliferation and apoptosis of sheep spermatogonial stem cells in vitro / L. Shi et al. *Animal Reproduction Science*. 2020. 106330. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106330>
71. Shoeibi S., Mashreghi M. Biosynthesis of selenium nanoparticles using *Enterococcus faecalis* and evaluation of their antibacterial activities. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2017. 39. P. 135–139. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.09.003>
72. Shukla A.K., Irvani S. Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles. Elsevier. 2018. Doi:<https://doi.org/10.1016/C2017-0-02526-0>
73. Singh P., Kim Y.J., Zhang D., Yang, D. C. Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. *Trends in biotechnology*. 2016. 34(7). P. 588–599. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.02.006>
74. Singh S. K., Kasana R. C., Yadav R. S., Pathak R. Current Status of Biologically Produced Nanoparticles in Agriculture. In *Biogenic Nano-Particles and their Use in Agro-ecosystems*. Springer, Singapore. 2020. P. 393–406. Doi:https://doi.org/10.1007/978-981-15-2985-6_21
75. Sinharoy A., Saikia S., Pakshirajan K. Biological removal of selenite from waste water and recovery as selenium nanoparticles using inverse fluidized bed bioreactor. *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 32. 100988. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100988>
76. Microbes for Bioremediation of Heavy Metals. In *Microbial Interventions in Agriculture and Environment* Springer / R. Soni et al. Singapore. 2019. P. 129–141. Doi:https://doi.org/10.1007/978-981-32-9084-6_6
77. Construction of arabinogalactans/selenium nanoparticles composites for enhancement of the antitumor activity / S. Tang et al. *International journal of biological macromolecules*. 2019. 128. P. 444–451. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.152>
78. Tendenedzai J. T., Brink H. G. The effect of nitrogen on the reduction of selenite to elemental selenium by *Pseudomonas stutzeri* NT-I. *CHEMICAL ENGINEERING*. 2019. 74 p. Doi: <https://doi.org/10.3303/CET1974089>
79. Effects of selenium compounds and toxicant action on oxidative biomarkers in quails / S.I. Tsekhmistrenko et al. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. 10(2). P. 232–239. Doi: https://doi.org/10.15421/2020_89
80. Bityutsky V.S., Spyvac M.Y., Tsekhmistrenko S.I., Shadura U.M. Perspectives of cerium nanoparticles use in agriculture / O.S. Tsekhmistrenko et al. *The Animal Biology*. 2017. Vol. 19. № 3. Львів, 2017. P. 9–18. URL:<http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/1300>
81. Tsekhmistrenko, O., & Tsekhmistrenko, S. Lipid peroxidation in the quails kidney under Cadmium load and Sel-Plex influence. *Технологія виробництва та переробки продукції тваринництва*: 36. наук. праць. 2015. Vol. 1 (116). Bila Tserkva. P. 203–207. URL:<http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/931>
82. Bacterial synthesis of nanoparticles: A green approach / S. I. Tsekhmistrenko et al. *Biosystems Diversity*. 2020. 28(1). P. 9–17. Doi: <https://doi.org/10.15421/012002>
83. Tsekhmistrenko S., Bityutskii V., Tsekhmistrenko O. Markers of oxidative stress in the blood of quails under the influence of selenium nanoparticles. 2020. URL:<http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/4763>
84. Enzyme-like activity of nanomaterials / S.I. Tsekhmistrenko et al. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2018. 9(3). P. 469–476. Doi:<https://doi.org/10.15421/021870>
85. Evaluation of effects of selenium nanoparticles on *Bacillus subtilis* / N.O. Tymoshok et al. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2019. 10(4). P. 544–552. Doi:<https://doi.org/10.15421/021980>
86. Vaishnavi S., Thamaraiselvi C., Vasanthy M. Efficiency of Indigenous Microorganisms in Bioremediation of Tannery Effluent. In *Waste Water Recycling and Management* Springer, Singapore. 2019. P. 151–168. Doi:https://doi.org/10.1007/978-981-13-2619-6_13
87. Vaseghi Z., Nematollahzadeh A., Tavakoli O. Green methods for the synthesis of metal nanoparticles using biogenic reducing agents: a review. *Reviews in Chemical Engineering*. 2018. 34(4). P. 529–559. Doi:<https://doi.org/10.1515/revce-2017-0005>
88. Wadhvani S. A., Shedbalkar U. U., Singh R., Chopade B. A. Biogenic selenium nanoparticles: current status and future prospects. *Applied microbiology and biotechnology*. 2016. 100(6). P. 2555–2566. Doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-016-7300-7>

89. Waghmare S. R., Mulla M. N., Marathe S. R., Sonawane K. D. Ecofriendly production of silver nanoparticles using *Candida utilis* and its mechanistic action against pathogenic microorganisms. *3 Biotech.* 2015. 5(1). P. 33–38. Doi:<https://doi.org/10.1007/s13205-014-0196-y>

90. Selenate reduction and selenium enrichment of tea by the endophytic *Herbaspirillum* sp. strain WT00C / X. Xu et al. *Current microbiology.* 2019. P. 1–14. Doi:<https://doi.org/10.1007/s00284-019-01682-z>

91. Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L / H. Yin et al. *Ecotoxicology and environmental safety.* 2019. 169. P. 911–917. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.080>

92. Adsorption of selenite onto *Bacillus subtilis*: the overlooked role of cell envelope sulfhydryl sites in the microbial conversion of Se (IV) / Q. Yu et al. *Environmental science & technology.* 2018. 52(18). P. 10400–10407. Doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02280>

93. Yumei L., Yamei L., Qiang L., Jie B. Rapid biosynthesis of silver nanoparticles based on flocculation and reduction of an exopolysaccharide from *arthrobacter* sp. B4: its antimicrobial activity and phytotoxicity. *Journal of Nanomaterials.* 2017. Doi:<https://doi.org/10.1155/2017/9703614>

94. Two selenium tolerant *Lysinibacillus* sp. strains are capable of reducing selenite to elemental Se efficiently under aerobic conditions / J. Zhang et al. *Journal of Environmental Sciences.* 2019. 77. P. 238–249. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.08.002>

95. Selenium-doped calcium carbonate nanoparticles loaded with cisplatin enhance efficiency and reduce side effects / P. Zhao et al. *International journal of pharmaceuticals.* 2019. 570 p. 118638. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ij-pharm.2019.118638>

96. Використання наночастинок металів та металів у пахивництві / О.С. Цехмістренко та ін. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва, № 2, 2019. Біла Церква, 2019. С. 113–130. URL:*<http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/3838>

97. Вплив Сел-плексу та кадмієвого навантаження на ліпопероксидацію / О.С. Цехмістренко та ін. *Збірник наукових праць. Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва.* 2013. Вип. 9 (103). С. 16–19. URL:<http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/957>

98. Цехмістренко О.С., Бітюцький В.С., Цехмістренко С.І. “Зелені” технології у синтезі наночастинок селену. Шляхи розвитку науки в сучасних кризових умовах: тези доп. І міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. 28-29 травня 2020 року. Дніпро, 2020. Т. 2. С. 506–509. URL:http://193.138.93.8/bitstream/BNAU/4823/1/Zeleni_tekhnolohii.pdf

99. Біоміметична та антиоксидантна активність нанополук діоксиду церію / О.С. Цехмістренко та ін. *Світ медицини та біології,* 2018, № 1 (63). Полтава, 2018. С. 196–201. Doi:<https://doi.org/10.267254 / 2079-8334-2018-1-63-196-201>

REFERENCES

1. Abbas, H., Abou Baker, D. (2020). Biological Evaluation of Selenium Nanoparticles biosynthesized by *Fusarium semitectum* as antimicrobial and anticancer agents.

Egyptian Journal of Chemistry. 63(4), pp. 18–19. Available at:<https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.15618.1945>

2. Achimovičová, M., Daneu, N., Tóthová, E., Mazaj, M., Dutková, E. (2019). Combined mechanochemical/thermal annealing approach for the synthesis of Co₉Se₈ with potential optical properties. *Applied Physics A.* 125(1), 8 p. Available at:<https://doi.org/10.1007/s00339-018-2305-y>

3. Adelere, I. A., Lateef, A. (2016). A novel approach to the green synthesis of metallic nanoparticles: the use of agro-wastes, enzymes, and pigments. *Nanotechnology Reviews.* 5(6), pp. 567–587. Available at:<https://doi.org/10.1515/nrtrev-2016-0024>

4. Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Alhuyi Nazari, M., Ahmadi, M. A., Pourfayaz, F., Lorenzini, G., Ming, T. (2019). Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review. *International Journal of Energy Research.* 43(4), pp. 1387–1410. Available at:<https://doi.org/10.1002/er.4282>

5. Alam, H., Khatoon, N., Raza, M., Ghosh, P. C., Sardar, M. (2019). Synthesis and characterization of nano selenium using plant biomolecules and their potential applications. *Bio Nano Science.* 9(1), pp. 96–104. Available at:<https://doi.org/10.1007/s12668-018-0569-5>

6. Alemzadeh, E., Dehshahri, A., Dehghanian, A. R., Afsharifar, A., Behjatnia, A. A., Izadpanah, K., Ahmadi, F. (2019). Enhanced anti-tumor efficacy and reduced cardiotoxicity of doxorubicin delivered in a novel plant virus nanoparticle. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* 174, pp. 80–86. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.11.008>

7. Ameri, A., Shakibaie, M., Pournamdari, M., Ameri, A., Foroutanfar, A., Doostmohammadi, M., Forootanfar, H. (2020). Degradation of diclofenac sodium using UV/biogenic selenium nanoparticles/H₂O₂: Optimization of process parameters. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.* Vol. 392. 112382. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112382>

8. Anchana, R. S., Arivarasu, L., Rajeshkumar, S. (2020). Green synthesis of garlic oil-mediated selenium nanoparticles and its antimicrobial and cytotoxic activity. *Drug Invention Today.* 14(2).

9. Banerjee, A., Gupta, P., Nigam, V., Bandopadhyay, R. (2019). Bacterial exopolysaccharides from extreme marine habitat of Southern Ocean: Production and partial characterization. *Gayana,* 83(2), pp. 126–134. Available at:<https://doi.org/10.4067/S0717-65382019000200126>

10. Bityutsky, V., Tsekhmistrenko, S., Tsekh-mistrenko, O., Melnychenko, O., Kharchyshyn, V. (2019). Effects of different dietary selenium sources including probiotics mixture on growth performance, feed utilization and serum biochemical profile of quails. In *Modern Development Paths of Agricultural Production* Springer, Cham. pp. 623–632. Available at:https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_61

11. Cardarelli, N. F. (2019). Tin as a vital nutrient: implications in cancer prophylaxis and other physiological processes. CRC press. Available at:<https://doi.org/10.1201/9780429280511>

12. Chandra, H., Kumari, P., Bontempi, E., Yadav, S. (2020). Medicinal plants: Treasure trove for green synthesis of metallic nanoparticles and their biomedical applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.* pp. 1015–1018. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101518>

13. Cruz, L. Y., Wang, D., Liu, J. (2019). Biosynthesis of selenium nanoparticles, characterization and X-ray induced radiotherapy for the treatment of lung cancer with interstitial lung disease. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 191, pp. 123–127. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.12.008>
14. Daphedar, A., Taranath, T. C. (2018). Green synthesis of zinc nanoparticles using leaf extract of *Albizia saman* (Jacq.) Merr. and their effect on root meristems of *Drimia indica* (Roxb.) Jessop. *Caryologia*. 71(2), pp. 93–102. Available at: <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1437980>
15. Decho, A. W., Gutierrez, T. (2017). Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. *Frontiers in microbiology*. 8, 922 p. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00922>
16. Elahian, F., Reisi, S., Shahidi, A., Mirzaei, S.A. (2017). High-throughput bioaccumulation, biotransformation, and production of silver and selenium nanoparticles using genetically engineered *Pichia pastoris*. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 13(3), pp. 853–861. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.10.009>
17. El-Batal, A. I., Mosallam, F. M., Ghorab, M. M., Hanora, A., Gobara, M., Baraka, A., El-Sayyad, G. S. (2019). Factorial design-optimized and gamma irradiation-assisted fabrication of selenium nanoparticles by chitosan and *Pleurotus ostreatus* fermented fenugreek for a vigorous in vitro effect against carcinoma cells. *International Journal of Biological Macromolecules*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.210>
18. Eswayah, A. S., Hondow, N., Scheinost, A. C., Merroun, M., Romero-González, M., Smith, T. J., Gardiner, P. H. (2019). Methyl selenol as a precursor in selenite reduction to Se/S species by methane-oxidizing bacteria. *Applied and environmental microbiology*. 85(22). Available at: <https://doi.org/10.1128/AEM.01379-19>
19. Fang, J., Zhu, P., Yang, Z., Peng, X., Zuo, Z., Cui, H., Liu, W. (2019). Selenium Ameliorates AFB 1- Induced Excess Apoptosis in Chicken Splenocytes Through Death Receptor and Endoplasmic Reticulum Pathways. *Biological trace element research*. 187(1), pp. 273–280. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1361-7>
20. Fardsadegh, B., Jafarizadeh-Malmiri, H. (2019). Aloe vera leaf extract mediated green synthesis of selenium nanoparticles and assessment of their in vitro antimicrobial activity against spoilage fungi and pathogenic bacteria strains. *Green Processing and Synthesis*. 8(1), pp. 399–407. Available at: <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0007>
21. Fardsadegh, B., Vaghari, H., Mohammad-Jafari, R., Najian, Y., Jafarizadeh-Malmiri, H. (2019). Biosynthesis, characterization and antimicrobial activities assessment of fabricated selenium nanoparticles using *Pelargonium zonale* leaf extract. *Green Processing and Synthesis*. 8(1), pp. 191–198. Available at: <https://doi.org/10.1515/gps-2018-0060>
22. Fedirko, V., Jenab, M., Méplan, C., Jones, J. S., Zhu, W., Schomburg, L., Omichessan, H. (2019). Association of selenoprotein and selenium pathway genotypes with risk of colorectal cancer and interaction with selenium status. *Nutrients*. 11(4), 935 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/nu11040935>
23. Fenech, M. (2020). The Role of Nutrition in DNA Replication, DNA Damage Prevention and DNA Repair. In *Principles of Nutrigenetics and Nutrigenomics*. Academic Press. pp. 27–32. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804572-5.00004-5>
24. Fernandes, A.P.N. (2019). Living capacitors: functional characterization of a novel cytochrome acting as a nanowire. Available at: <http://hdl.handle.net/10362/91579>
25. Fischer, S., Krause, T., Lederer, F., Merroun, M. L., Shevchenko, A., Hübner, R., Jain, R. (2020). *Bacillus safensis* JG-B5T affects the fate of selenium by extracellular production of colloidal less stable selenium nanoparticles. *Journal of hazardous materials*. 384. 121146. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121146>
26. Gahlawat, G., Choudhury, A. R. (2019). A review on the biosynthesis of metal and metal salt nanoparticles by microbes. *RSC advances*. 9(23), pp. 12944–12967. Available at: <https://doi.org/10.1039/C8RA10483B>
27. Gao, X., Li, X., Mu, J., Ho, C. T., Su, J., Zhang, Y., Xie, Y. (2020). Preparation, physicochemical characterization, and anti-proliferation of selenium nanoparticles stabilized by *Polyporus umbellatus* polysaccharide. *International Journal of Biological Macromolecules*. 152, pp. 605–615. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.199>
28. Garg, N., Bharti, A., Sharma, A., Saroy, K., Cheema, A., Bisht, A. (2020). Prokaryotic and Eukaryotic Microbes: Potential Tools for Detoxification and Bioavailability of Metalloids. *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*. pp. 149–183. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch9>
29. Habibi, G., Aleyasin, Y. (2020). Green synthesis of Se nanoparticles and its effect on salt tolerance of barley plants. *Int. J. Nano Dimens*. 11(2), pp. 145–157.
30. Hadrup, N., Loeschner, K., Mandrup, K., Ravn-Haren, G., Frandsen, H. L., Larsen, E. H., Mortensen, A. (2019). Subacute oral toxicity investigation of selenium nanoparticles and selenite in rats. *Drug and chemical toxicology*. 42(1), pp. 76–83. Available at: <https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1491589>
31. Hao, N., Li, L., Tang, F. (2017). Roles of particle size, shape and surface chemistry of mesoporous silica nanomaterials on biological systems. *International Materials Reviews*. 62(2), pp. 57–77. Available at: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1190118>
32. Hentschel, M., Schäferling, M., Duan, X., Giessen, H., Liu, N. (2017). Chiral plasmonics. *Science advances*. 3(5), e1602735. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602735>
33. Huang, Y., Ren, J., Qu, X. (2019). Nanozymes: classification, catalytic mechanisms, activity regulation, and applications. *Chemical reviews*. 119(6), pp. 4357–4412. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00672>
34. Iqbal, T., Tehseen, A., Anwar, M., Masooma, S., Bashir, A. (2020). A Short Review on Role of Nanotechnology in Daily Life. *Research & Reviews: Journal of Computational Biology*. 8(3), pp. 24–33. Available at: <http://medicaljournals.stmjournals.in/index.php/RRJoCB/article/view/1833>
35. Iravani, S., Varma, R. S. (2020). Bacteria in Heavy Metal Remediation and Nanoparticle Biosynthesis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 8(14), pp. 5395–5409. Available at: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00292>
36. Kamali, M., Costa, M. E. V., Otero-Irurueta, G., Capela, I. (2019). Ultrasonic irradiation as a green production route for coupling crystallinity and high specific surface area in iron nanomaterials. *Journal of cleaner production*.

211, pp. 185–197. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.127>

37. Keyhani, A., Ziaali, N., Shakibaie, M., Kareshk, A. T., Shojae, S., Asadi-Shekaari, M., Mahmoudvand, H. (2020). Biogenic selenium nanoparticles target chronic toxoplasmosis with minimal cytotoxicity in a mouse model. *Journal of Medical Microbiology*. 69(1), pp. 104–110. Available at:<https://doi.org/10.1099/jmm.0.001111>

38. Kim, H.W., Hong, S. H., &Choi, H. (2020). Effect of Nitrate and Perchlorate on Selenate Reduction in a Sequencing Batch Reactor. *Processes*. 8(3), 344 p. Available at:<https://doi.org/10.3390/pr8030344>

39. Kim, Y. J., Perumalsamy, H., Markus, J., Balusamy, S. R., Wang, C., Ho Kang, S., Kim, S. H. (2019). Development of *Lactobacillus kimchicus* DCY51T-mediated gold nanoparticles for delivery of ginsenoside compound K: in vitro photothermal effects and apoptosis detection in cancer cells. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*. 47(1), pp. 30–44. Available at:<https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1541900>

40. Korde, P., Ghotekar, S., Pagar, T., Pansambal, S., Oza, R., Mane, D. (2020). Plant Extract Assisted Eco-benevolent Synthesis of Selenium Nanoparticles-A Review on Plant Parts Involved, Characterization and Their Recent Applications. *Journal of Chemical Reviews*. pp. 157–168.

41. Kurmi, B. D., Patel, P., Paliwal, R., Paliwal, S. R. (2020). Molecular approaches for targeted drug delivery towards cancer: A concise review with respect to nanotechnology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 101682. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101682>

42. Liang, S. X. T., Wong, L. S., Dhanapal, A. C. T. A., Djearmane, S. (2020). Toxicity of Metals and Metallic Nanoparticles on Nutritional Properties of Microalgae. *Water, Air, & Soil Pollution*. 231(2), 52 p. Available at:<https://doi.org/10.1007/s11270-020-4413-5>

43. Luo, M., Huang, S., Zhang, J., Zhang, L., Mehmood, K., Jiang, J., Zhou, D. (2019). Effect of selenium nanoparticles against abnormal fatty acid metabolism induced by hexavalent chromium in chicken's liver. *Environmental Science and Pollution Research*. 26(21), pp. 21828–21834. Available at:<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05397-3>

44. Majeed, M. I., Bhatti, H. N., Nawaz, H., Kashif, M. (2019). Nanobiotechnology: Applications of nanomaterials in biological research. *Integrating green chemistry and sustainable engineering*. pp. 581–615.

45. Markwart, B., Liber, K., Xie, Y., Raes, K., Hecker, M., Janz, D., Doig, L. E. (2019). Selenium oxyanion bioconcentration in natural freshwater periphyton. *Ecotoxicology and environmental safety*. 180, pp. 693–704. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.004>

46. McClements, J., McClements, D.J. (2016). Standardization of nanoparticle characterization: methods for testing properties, stability, and functionality of edible nanoparticles. *Critical reviews in food science and nutrition*. 56(8), pp. 1334–1362. Available at:<https://doi.org/10.1080/10408398.2014.970267>

47. Mellinas, C., Jiménez, A., Garrigós, M. D. C. (2019). Microwave-Assisted Green Synthesis and Antioxidant Activity of Selenium Nanoparticles Using *Theobroma cacao* L. Bean Shell Extract. *Molecules*. 24(22), pp. 40–48. Available at:<https://doi.org/10.3390/molecules24224048>

48. Menon, S., KS, S. D., Agarwal, H., Shanmugam, V. K. (2019). Efficacy of Biogenic Selenium Nanoparticles from an extract of ginger towards evaluation on anti-microbial and anti-oxidant activities. *Colloid and Interface Science Communications*. 29, pp. 1–8. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.colcom.2018.12.004>

49. Mohanta, D., Ahmaruzzaman, M. (2020). Addressing Nanotoxicity: Green Nanotechnology for a Sustainable Future. *The ELSI Handbook of Nanotechnology: Risk, Safety, ELSI and Commercialization*. pp. 103–112. Available at:<https://doi.org/10.1002/9781119592990.ch6>

50. Mosallam, F. M., El-Sayyad, G. S., Fathy, R. M., El-Batal, A. I. (2018). Biomolecules-mediated synthesis of selenium nanoparticles using *Aspergillus oryzae* fermented Lupin extract and gamma radiation for hindering the growth of some multidrug-resistant bacteria and pathogenic fungi. *Microbial pathogenesis*. 122, pp. 108–116. Available at:<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.06.013>

51. Mukherjee, S., Nethi, S. K. (2019). Biological Synthesis of Nanoparticles Using Bacteria. In *Nanotechnology for Agriculture*. Springer, Singapore. pp. 37–51.

52. Muthu, S., Raju, V., Gopal, V. B., Gunasekaran, A., Narayan, K. S., Malairaj, S., Perumal, P. (2019). A rapid synthesis and antibacterial property of selenium nanoparticles using egg white lysozyme as a stabilizing agent. *SN Applied Sciences*. 1(12), 1543 p. Available at:<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1509-x>

53. Mykhaylenko, N. F., Zolotareva, E. K. (2017). The effect of copper and selenium nanocarboxylates on biomass accumulation and photosynthetic energy transduction efficiency of the green algae *Chlorella vulgaris*. *Nanoscale research letters*. 12(1), 147 p. Available at:<https://doi.org/10.1186/s11671-017-1914-2>

54. Orr, S. E., George, H. S., Barnes, M. C., Mathis, T. N., Joshee, L., Barkin, J., Bridges, C. C. (2019). Co-administration of Selenium with Inorganic Mercury Alters the Disposition of Mercuric Ions in Rats. *Biological trace element research*. pp. 1–9. Available at:<https://doi.org/10.1007/s12011-019-01835-y>

55. Parsameher, N., Rezaei, S., Khodavasiy, S., Salari, S., Hadizade, S., Kord, M., Mousavi, S. A. A. (2017). Effect of biogenic selenium nanoparticles on ERG11 and CDR1 gene expression in both fluconazole-resistant and-susceptible *Candida albicans* isolates. *Current medical mycology*. 3(3), 16 p. Available at:<https://doi.org/10.29252/cmm.3.3.16>

56. Pouri, S., Motamedi, H., Honary, S., Kazeminezhad, I. (2017). Biological synthesis of selenium nanoparticles and evaluation of their bioavailability. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 60 p. Available at:<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2017160452>

57. Preedy, V. R. (2015). *Selenium: Chemistry, Analysis, Function and Effects*. Royal Society of Chemistry.

58. Rahman, Z., Singh, V. P. (2020). Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research International*. Available at:<https://doi.org/10.1007/s11356-020-08903-0>

59. Rajeshkumar, S., Veena, P., Santhiyaa, R. V. (2018). Synthesis and Characterization of Selenium Nanoparticles Using Natural Resources and Its Applications. In *Exploring the Realms of Nature for Nanosynthesis*. Springer, Cham. pp. 63–79. Available at:https://doi.org/10.1007/978-3-319-99570-0_4

60. Regulacio, M. D., Yang, D. P., & Ye, E. (2020). Toward greener methods of producing branched metal nanostructures. *Cryst Eng Comm*. 22(3), pp. 399–411.
61. Rehan, M., Alsohim, A. S., El-Fadly, G., Tisa, L. S. (2019). Detoxification and reduction of selenite to elemental red selenium by *Frankia*. *Antonie van Leeuwenhoek*. 112(1), pp. 127–139. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1196-4>
62. Rentería, V., Franco, A. (2019). Metal Nanoparticles Dispersed in Epoxy Resin: Synthesis, Optical Properties and Applications. In *Reviews in Plasmonics 2017*. Springer, Cham. pp. 191–228. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18834-4_8
63. Rol N., Tsekhmistrenko S., Tsekhmistrenko O., Polishchuk V., Polishchuk S., Ponomarenko N., Seleznyova O. Lipid Peroxidation In The Body Of Different Species Of Animals And Birds. – 3rd International Conference “Smart Bio”, 02-04 May 2019. Kaunas, Lithuania. 159 p. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/4665>
64. Saadi, A., Dalir-Naghadeh, B., Asri-Rezaei, S., Anassori, E. (2020). Platelet Selenium Indices as Useful Diagnostic Surrogate for Assessment of Selenium Status in Lambs: an Experimental Comparative Study on the Efficacy of Sodium Selenite vs. Selenium Nanoparticles. *Biological Trace Element Research*. 194(2), pp. 401–409. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01784-6>
65. Sakamoto, I. K., Maintiguer, S. I., Varesche, M. B. A. (2019). Phylogenetic characterization and quantification by Most Probable Number of the microbial communities of biomass from the Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor under sulfidogenic conditions. *Acta Scientiarum. Technology*. 41, 39128 p. Available at: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v41i1.39128>
66. Salem, S. S., Fouda, A. (2020). Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: an overview. *Biol Trace Elem Res*. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02138-3>.
67. Samsudin, A. A., Dalia, A. M., Loh, T. C., Sazili, A. Q. (2020). Influence of Bacterial Organic Selenium on Blood Parameters, Immune Response, Selenium Retention and Intestinal Morphology of Broiler Chickens. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.2.23476/v1>
68. Sardar, M., Mazumder, J. A. (2019). Biomolecules assisted synthesis of metal nanoparticles. In *Environmental Nanotechnology*. Springer, Cham. pp. 1–23. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-98708-8_1
69. Shang, Y., Hasan, M., Ahammed, G. J., Li, M., Yin, H., Zhou, J. (2019). Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. *Molecules*. 24(14), 2558 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
70. Shi, L., Duan, Y., Yao, X., Song, R., Ren, Y. (2020). Effects of selenium on the proliferation and apoptosis of sheep spermatogonial stem cells in vitro. *Animal Reproduction Science*. 106330. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106330>
71. Shoebis S., Mashreghi M. Biosynthesis of selenium nanoparticles using *Enterococcus faecalis* and evaluation of their antibacterial activities. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2017, 39, pp. 135–139. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.09.003>
72. Shukla, A. K., Iravani, S. (2018). Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles. Elsevier. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02526-0>
73. Singh, P., Kim, Y. J., Zhang, D., Yang, D. C. (2016). Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. *Trends in biotechnology*. 34(7), pp. 588–599. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.02.006>
74. Singh, S. K., Kasana, R. C., Yadav, R. S., Pathak, R. (2020). Current Status of Biologically Produced Nanoparticles in Agriculture. In *Biogenic Nano-Particles and their Use in Agro-ecosystems*. Springer, Singapore. pp. 393–406. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2985-6_21
75. Sinharoy, A., Saikia, S., & Pakshirajan, K. (2019). Biological removal of selenite from wastewater and recovery as selenium nanoparticles using inverse fluidized bed bioreactor. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 32. 100988. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100988>
76. Soni, R., Dash, B., Kumar, P., Mishra, U. N., Goel, R. (2019). Microbes for Bioremediation of Heavy Metals. In *Microbial Interventions in Agriculture and Environment*. Springer, Singapore. pp. 129–141. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9084-6_6
77. Tang, S., Wang, T., Jiang, M., Huang, C., Lai, C., Fan, Y., Yong, Q. (2019). Construction of arabinogalactans/selenium nanoparticles composites for enhancement of the antitumor activity. *International journal of biological macromolecules*. 128, pp. 444–451. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.152>
78. Tendenedzai, J. T., Brink, H. G. (2019). The effect of nitrogen on the reduction of selenite to elemental selenium by *Pseudomonas stutzeri* NT-I. *CHEMICAL ENGINEERING*. 74 p. Available at: <https://doi.org/10.3303/CET1974089>
79. Tsekhmistrenko, S.I., Bityutskyy, V.S., Tsekhmistrenko, O.S., Melnichenko, O.M., Kharchyshyn, V.M., Tymoshok, N.O., Ponomarenko, N.V., Polishchuk, S.A., Roll, N.V., Fedorchenko, M.M., Melnichenko, Yu.O., Merzlova, H.V., Shulko, O.P., Demchenko, A.A. (2020). Effects of selenium compounds and toxicant action on oxidative biomarkers in quails. *Ukrainian Journal of Ecology*. 10(2), pp. 232–239. Available at: https://doi.org/10.15421/2020_89
80. Tsekhmistrenko, O.S., Bityutsky, V.S., Spyvac, M.Y., Tsekhmistrenko, S.I., Shadura, U.M. (2017). Perspectives of cerium nanoparticles use in agriculture. *The Animal Biology*. Lviv, Vol. 19, no. 3. pp. 9–18. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/1300>
81. Tsekhmistrenko, O., Tsekhmistrenko, S. (2015). Lipid peroxidation in the quails kidney under Cadmium load and Sel-Plex influence. *Tehnologija vyrobnyctva i pererobky produkciitvarynyctva: Zb. nauk. prac'[Technology of production and processing of livestock products: Collection of scientific works]*. Vol. 1 (116), Bila Tserkva. pp. 203–207. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/931>
82. Tsekhmistrenko, S. I., Bityutskyy, V. S., Tsekhmistrenko, O. S., Horalskyi, L. P., Tymoshok, N. O., Spivak, M. Y. (2020). Bacterial synthesis of nanoparticles: A green approach. *Biosystems Diversity*. 28(1), pp. 9–17. Available at: <https://doi.org/10.15421/012002>
83. Tsekhmistrenko, S., Bityutskii, V., Tsekhmistrenko, O. (2020). Markers of oxidative stress in the blood of quails under the influence of selenium nanoparticles. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/4763>

84. Tsekhmistrenko, S.I., Bityutskyy, V.S., Tsekhmistrenko, O.S., Polishchuk, V.M., Polishchuk, S.A., Ponomarenko, N.V., Melnychenko, Y.O., Spivak, M.Y. (2018). Enzyme-like activity of nanomaterials. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 9(3). pp. 469–476. Available at: <https://doi.org/10.15421/021870>
85. Tymoshok, N. O., Kharchuk, M. S., Kaplunenko, V. G., Bityutskyy, V. S., Tsekhmistrenko, S. I., Tsekhmistrenko, O. S., Spivak, M. Y., Melnichenko O. M. (2019). Evaluation of effects of selenium nanoparticles on *Bacillus subtilis*. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 10(4), pp. 544–552. Available at: <https://doi.org/10.15421/021980>
86. Vaishnavi, S., Thamaraiselvi, C., Vasanthi, M. (2019). Efficiency of Indigenous Microorganisms in Bioremediation of Tannery Effluent. In *Waste Water Recycling and Management*. Springer, Singapore. pp. 151–168. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2619-6_13
87. Vaseghi, Z., Nematollahzadeh, A., Tavakoli, O. (2018). Green methods for the synthesis of metal nanoparticles using biogenic reducing agents: a review. *Reviews in Chemical Engineering*. 34(4), pp. 529–559. Available at: <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0005>
88. Wadhvani, S. A., Shedbalkar, U. U., Singh, R., Chopade, B. A. (2016). Biogenic selenium nanoparticles: current status and future prospects. *Applied microbiology and biotechnology*. 100(6), pp. 2555–2566. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7300-7>
89. Waghmare, S. R., Mulla, M. N., Marathe, S. R., Sonawane, K. D. (2015). Ecofriendly production of silver nanoparticles using *Candida utilis* and its mechanistic action against pathogenic microorganisms. *3 Biotech*. 5(1), pp. 33–38. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0196-y>
90. Xu, X., Cheng, W., Liu, X., You, H., Wu, G., Ding, K., Gu, H. (2019). Selenate reduction and selenium enrichment of tea by the endophytic *Herbaspirillum* sp. strain WT00C. *Current microbiology*. pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01682-z>
91. Yin, H., Qi, Z., Li, M., Ahammed, G. J., Chu, X., Zhou, J. (2019). Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L. *Ecotoxicology and environmental safety*. 169, pp. 911–917. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.080>
92. Yu, Q., Boyanov, M. I., Liu, J., Kemner, K. M., Fein, J. B. (2018). Adsorption of selenite onto *Bacillus subtilis*: the overlooked role of cell envelope sulfhydryl sites in the microbial conversion of Se (IV). *Environmental science & technology*. 52(18), pp. 10400–10407. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02280>
93. Yumei, L., Yamei, L., Qiang, L., Jie, B. (2017). Rapid biosynthesis of silver nanoparticles based on flocculation and reduction of an exopolysaccharide from *arthro bacter* sp. B4: its antimicrobial activity and phytotoxicity. *Journal of Nanomaterials*. Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/9703614>
94. Zhang, J., Wang, Y., Shao, Z., Li, J., Zan, S., Zhou, S., Yang, R. (2019). Two selenium tolerant *Lysinibacillus* sp. strains are capable of reducing selenite to elemental Se efficiently under aerobic conditions. *Journal of Environmental Sciences*. 77, pp. 238–249. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.08.002>
95. Zhao, P., Li, M., Chen, Y., He, C., Zhang, X., Fan, T., Luo, J. (2019). Selenium-doped calcium carbonate nanoparticles loaded with cisplatin enhance efficiency and reduce side effects. *International journal of pharmaceutics*. 570 p. 118638. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118638>
96. Tsekhmistrenko, O.S., Bityutskyy, V.S., Tsekhmistrenko, S.I., Mel'nychenko, O.M., Tymoshok, N.O., Spivak, M.Ya. (2019). Vykorystannya nanochastynok metaliv ta nemetaliv u ptakhivnytstvi [Use of metal and non-metal nanoparticles in poultry farming]. *Tekhnolohiya vyrobnytstva I pererobky produktsiyi tvarynnytstva*, № 2, 2019 [Technology of production and processing of livestock products, no. 2, 2019]. Bila Tserkva, pp. 113–130. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/3838>
97. Tsekhmistrenko, O.S., Tsekhmistrenko, S.I., Devesha, I.O., Ponomarenko, N.V., Polishchuk, V.M., Yaremchuk, T.S. (2013). Vplyv Sel-pleksu ta kadmijevogo navantazhenja na lipoperoksydaciju [Influence of Sel-plex and cadmium load on lipoperoxidation]. *Zbirnyk naukovykh prac' [Collection of scientific works]. Tehnologija vyrobnytstva i pererobky produktsii' tvarynnytstva [Technology of production and processing of livestock products]. Issue 9 (103), pp. 16–19. Available at: http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/957*
98. Tsekhmistrenko, O.S., Bityutskyy, V.S., Tsekhmistrenko, S.I. (2020). “Zeleni” tekhnolohiyi u syntezi nanochastynok selenu ["Green" technologies in the synthesis of selenium nanoparticles]. *Shlyakhy rozvytku nauky v suchasnykh kryzovykh umovakh: tezy dop I mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi internet-konferentsiyi*, 28-29 travnya 2020 roku [Ways of development of science in modern crisis conditions: theses add. I International Scientific and Practical Internet Conference. May 28-29, 2020]. Dnipro, Vol. 2, pp. 506–509. Available at: http://193.138.93.8/bitstream/BNAU/4823/1/Zeleni_tekhnolohii.pdf
99. Tsekhmistrenko, O.S., Tsekhmistrenko, S.I., Bityutskyy, V.S., Mel'nychenko, O.M., Oleshko, O.A. *Biomimetychna ta antyoksydantna aktyvnist' nanopoluk dioksydu ceriju [Biomimetic and antioxidant activity of cerium dioxide nanocompounds]. Svit medycyny ta biologii'*, 2018, № 1 (63) [World of Medicine and Biology, 2018, № 1 (63)]. Poltava, 2018. pp. 196–201. Available at: <https://doi.org/10.267254/2079-8334-2018-1-63-196-201>

**Биологические методы синтеза наночастиц селена, их характеристики и свойства
Цехмистренко О.С.**

Нанотехнологии влияют на каждую сферу жизни, меняют подходы в восстановлении окружающей среды, внедряют новые методы анализа заболеваний и профилактики, лечения, доставки лекарств и генной терапии, влияющие на обеспечение экологически благоприятных альтернативных источников энергии, повышают урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность животных и птицы. Рассмотрены физические, химические, биологические методы синтеза наночастиц, селена в частности, их свойства и факторы, принимающие участие в восстановлении ионов металлов до наночастиц. Рассмотрены ограничения синтеза наночастиц, присущие биологическому методу (идентификация и выделение биоактивного фрагмента, ответственного за биоминерализацию ионов металлов, анализ способов разработки отдельных наночастиц), и факторы, способ-

ствующие интенсификации производства наночастиц (оптимизация pH, температуры, времени контакта, степени смешения, концентрации соли и изменения общего заряда функциональных органических молекул на клеточной стенке). Доказано, что эти факторы еще во время синтеза влияют на размер, морфологию, состав наночастиц и их эффективность. Суммирована модель зеленого синтеза с использованием физико-химических средств и их биомедицинские применения. Представлены организмы, используемые для синтеза NPs – наземные и морские бактерии, бактериальные внеклеточные полимерные вещества в виде биоредуктантов, грибы, дрожжи, водоросли, вирусы, микроорганизмы. Описаны биохимические способы борьбы микроорганизмов с токсичностью металлов при синтезе нанопродукции и факторы, обуславливающие токсичность металлов, которые превращаются в наночастицы (размер, форма, покрывающий агент, плотность наночастиц и тип патогена). Доказано биологическое значение селена и особенности его влияния на организм в наноразмерной шкале.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноселен, бактерии, зеленый синтез, ферменты.

The Biological methods of selenium nanoparticles synthesis, their characteristics and properties

Tsehmistrenko O.

Nanotechnologies have an impact on every sphere of life, change approaches to environmental recovery, introduce new methods of disease analysis and prevention, treatment, drug delivery and gene therapy, affect the provision of en-

vironmentally friendly alternative energy sources, increase crop yields, animal and poultry productivity. Physical, chemical, biological methods of synthesis of nanoparticles, selenium in particular, their properties and the factors participating in reduction of metal ions to nanoparticles are considered. Limitations of nanoparticle synthesis inherent in the biological method (identification and isolation of bioactive fragment responsible for biomineralization of metal ions, analysis of ways to develop individual nanoparticles) and factors contributing to the intensification of nanoparticle production (optimization of pH, temperature, contact time, mixing degree) changes in the total charge of functional organic molecules on the cell wall).

It has been proved that these factors affect the size, morphology, composition of nanoparticles and their efficiency during the synthesis. The model of green synthesis with the use of physicochemical means and their biomedical applications have been summarized. There are organisms used for the synthesis of NPs - terrestrial and marine bacteria, bacterial extracellular polymeric substances as bioreductants, fungi, yeast, algae, viruses, microorganisms. It has been demonstrated the biochemical ways of microorganisms in order to fight the toxicity of metals during the synthesis of nanoproducts and the factors that determine the toxicity of metals that are converted into nanoparticles (size, shape, coating agent, nanoparticle density and type of pathogen). The biological role of selenium and features of its influence on an organism in a nanoscale scale are shown.

Key words: nanotechnologies, nanoselenium, bacteria, green synthesis, enzymes.



Copyright: Цехмістренко О.С. та ін. © 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.



Цехмістренко О.С.

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