


ВОДНІ БІОРЕСУРСИ ТА АКВАКУЛЬТУРА

УДК 639.3.043.13

Використання різних форм селену в аквакультурі (огляд)

Олешко О.А. , Бітюцький В.С. , Мельниченко О.М. , Гейко Л.М. 

Білоцерківський національний аграрний університет

 Олешко О.А. E-mail: oleshko-bc@ukr.net

Олешко О.А., Бітюцький В.С., Мельниченко О.М., Гейко Л.М. Використання різних форм селену в аквакультурі (огляд). Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2021. № 1. С. 159–170.

Oleshko O.A., Bitjuc'kyj V.S., Mel'nichenko O.M., Gejko L.M. Vykorystannja ryznyh form selenu v akvakulturi (ogljad). Zbirnyk naukovykh prac' «Tehnologija vyrobnyctva i pererobky produkciї tvarynnyctva», 2021. № 1. PP. 159–170.

Рукопис отримано: 22.01.2021 р.
Прийнято: 05.02.2021 р.
Затверджено до друку: 25.05.2021 р.

doi: 10.33245/2310-9289-2021-164-1-159-170

Узагальнено дослідження наукової літератури щодо використання методів нанотехнології за вирощування різноманітних об'єктів аквакультури, які базуються на додаванні до раціонів селену різних форм та походження. Підкреслено, що сучасні наукові дослідження з використання наночастинок в аквакультурі спрямовано на точність доставлення і відповідну кількість мікроелементів, що надалі може вплинути на зниження собівартості продукції аквакультури.

Зазначено, що необхідно враховувати специфіку сучасних індустриальних технологій аквакультури, за яких водні організми вирощуються за високою щільністю посадки в басейнах, тобто постійно знаходяться в умовах стресу, а однією з найбільш поширених форм стресу, яка призводить до зниження продуктивності в галузі аквакультури, є окиснювальний стрес. Відзначено, що селен є одним із важливих мікронутрієнтів, який може знижувати негативну дію окиснювального стресу.

Проаналізовано дослідження ряду авторів щодо позитивного впливу додавання різних форм селену в раціони основних об'єктів аквакультури. Визначено, що біологічно синтезований наноселен можна додавати в різні комерційні рибні корми для підвищення стресостійкості і продуктивності, також цей продукт буде відповідати екологічним потребам споживачів.

Встановлено перевагу використання в аквакультурі органічних форм селену над неорганічними, оскільки перші мають вищу біодоступність та краще накопичення в тканинах риб.

Проаналізовано низку досліджень, пов'язаних із визначенням токсичної дії різних форм селену та його концентрацій на риб. Зазначено, що в аквакультурі необхідно враховувати, що частинки селену мають бути нетоксичними не лише для самого біологічного об'єкта, а й для інших систем, які тісно пов'язані з ним його життєдіяльністю.

Ключові слова: селен, нанотехнології, аквакультура, риби, стресостійкість, токсичність, темп росту, фізіологічні показники, імунологічні показники.

Постановка проблеми. Зі збільшенням населення у світі та швидким економічним розвитком зростає потреба у забезпеченні людства білковими речовинами. Завдяки харчовим характеристикам гідробіонтів та їх позитивному впливу на здоров'я людини продукція аквакультури як важливе джерело калорійної їжі та тваринного білка завжди високо цінувалися.

Оскільки в останні десятиріччя спостерігався підвищений антропогенний вплив на природні запаси риби та морепродуктів у світовому океані, в багатьох країнах почали інтен-

сивно розвивати аквакультуру, продукція якої сьогодні становить до 50 % світових потреб у харчовій рибі [1].

Постала проблема заповнення значної прогалини в технічних інноваціях за вирощування об'єктів аквакультури в штучних умовах, які пов'язані із використанням ліків, підвищенням продуктивності завдяки епігенетичній та нутрігеномній взаємодії, забезпечення більш раннього дозрівання та зменшення тривалості нересту тощо [2]. Для подолання цих проблем необхідний комплексний підхід, який базується

на розумінні, інтеграції та використанні нових наукових стратегій за створення ефективних технологій сучасної аквакультури. Нині сектор аквакультури зазнає впливу наукових та технологічних інновацій для виробництва більш якісного кінцевого продукту. Значно впливають на це останні досягнення нанотехнології, які швидко перетворюються на науково-технічну платформу для розвитку та трансформації агропродовольчих систем [3,4].

Нанотехнології широко застосовують у різних галузях: косметології, медицині, електроніці, тваринництві, птахівництві та ін. [5–11]. Водночас передбачається застосування наночастинок матеріалів або речовин до нових продуктів і процесів розміром у діапазоні 1–100 нм [12]. Постачання неорганічних елементів у системі аквакультури на основі наночастинок зумовлює інтерес у фахівців рибогосподарської галузі за різними напрямками – годівля, профілактика і лікування захворювань, екологія та ін. Усе це може допомогти вирішити глобальні проблеми, пов'язані з виробництвом водних організмів, підвищити їх екологічну стійкість і резистентність до хвороб [13]. Останнім часом набуває значення видобування наночастинок різних елементів з рослинних джерел [14] та за участю мікроорганізмів [15,16] – зелений синтез, продукти якого не мають шкідливого впливу на навколишнє середовище [17].

Національна нанотехнологічна ініціатива США дає визначення нанотехнології як «розуміння та контроль матерії за розмірів приблизно від 1 до 100 нм, де унікальні явища дають нові можливості». Більш детально це може бути визначено як «вивчення, проектування, створення, синтез, маніпулювання та використання пристроїв і систем із функціональних матеріалів за управління матерією в нанометровому масштабі, яка знаходиться на атомному і молекулярному рівнях, та використання нових явищ і властивостей матерії в цьому масштабі». Необхідно зазначити, що не існує конкретного та всеосяжного визначення наноматеріалів, і дотепер низка визначень була запропонована урядом, промисловістю та організаціями зі стандартизації [18].

Визначення «нано», яке основане на розмірі, досі обговорюється, оскільки визначення наноматеріалів у вигляді частинок може призвести до неправильного тлумачення. Ці частинки можуть бути присутні або у вигляді окремих частинок, або у вигляді агломератів чи агрегатів, які мають зовнішні розміри значно більші за 100 нм, і їх не можна буде розглядати як наноматеріали. Однак ці агломерати або агрегати зберігають певні фізико-хімічні вла-

стивості наноматеріалів. Отже, окрім розміру, за визначення поняття наноматеріалів необхідно враховувати й інші характеристики, наприклад розчинність [19].

Метою огляду є аналіз досягнень використання різних форм селену за вирощування риб, а також обґрунтування важливості екологічно-чистих, нетоксичних природних стратегій для розвитку стабільної стійкої аквакультури.

Зниження дії окиснювального стресу у риб за використання різних форм селену.

Сучасні наукові дослідження з використання наночастинок в аквакультурі спрямовано на точність доставки і відповідну кількість мікроелементів, що надалі може вплинути на зниження собівартості продукції. Окрім того, необхідно враховувати індустриальні технології аквакультури, за якими водні організми вирощуються з високою щільністю посадки в басейнах, тобто постійно знаходяться в умовах стресу [20].

Viplab Sarkar та інші науковці з Національного інституту управління абіотичними стресами зазначають, що однією з найбільш поширених форм стресу, яка призводить до зниження продуктивності в галузі аквакультури, є окиснювальний стрес [21]. За визначенням Klaus A., окиснювальний стрес є універсальним патофізіологічним явищем, за якого пошкоджуються клітини внаслідок безперервного вивільнення активних форм кисню (АФК) [22]. Одним із важливих мікронутрієнтів, який може знижувати негативну дію окиснювального стресу, є селен. У живих організмах селен міститься переважно у формі селеновмісних білків і має важливе значення у метаболічних процесах. Він входить до складу активних центрів ферментів глутатіонпероксидази і тіоредоксинредуктази, які забезпечують антиоксидантний захист [23,24].

Біологічно синтезований наноселен можна додавати в різні комерційні рибні корми для підвищення стресостійкості і продуктивності, також цей продукт буде відповідати екологічним потребам споживачів [25].

Важливим чинником, який необхідно враховувати за використання різних форм селену є те, що селеніту та селенметіоніну необхідно пройти низку трансформацій для того, щоб через декілька проміжних сполук та утворення селенцистеїну вбудуватися в антиоксидантні селенпротеїни. На відміну від них, наноселен, який синтезовано біогенним способом за участю редуруючих речовин бактерій, починає проявляти антиоксидантні властивості ще у наноформі, активуючи деякі важливі сигнальні шляхи в клітині.

Підтвердженням цього є дослідження щодо синтезування нових форм наночастинок селену – біогенного наноселену (BNS), з використанням бактерій. Аналіз довів, що ці частинки BNS являли собою монодисперсні і гомогенні сфери із середнім розміром $139,43 \pm 7,44$ нм.

Було досліджено захисну дію BNS за дисфункції кишкового бар'єра, яка спричинена окиснювальним стресом, та механізми, притаманні цьому процесу. Для порівняння використовували частинки селенметіоніну (SeMe) і хімічно-синтезованого наноселену (Nano-Se). Виявлено, що в моделі кишкового окиснювального стресу частинки BNS захищають кишкову бар'єрну функцію і зберігають окисно-відновний гомеостаз кишківника більш ефективно, ніж SeMet і Nano-Se. BNS активував ядерний чинник та підсилював експресію його генів, зокрема тіоредоксинредуктазу (TXNRD)-1, NADPH-дегідрогеназу (NQO)-1, гемоксигеназу (HO)-1 та тіоредоксин (Trx) залежно від дози та часу. SeMet і Nano-Se, навпаки, просто підсилювали активність селен ферментів TXNRD-1 і глутатіонпероксидази (GPx)-1, що вказувало на функцію донорів селену.

Результати досліджень дали змогу авторам припустити, що BNS є переважною формою селену для потенційного використання кишкових захворювань, пов'язаних з окиснювальним стресом [26].

Вплив різних форм селену на темпи росту, фізіологічні та імунологічні показники об'єктів аквакультури.

Дослідники з Індійського технологічного інституту Гувахаті зазначають, що в разі застосування мікроелементів для водних тварин на основі нанотехнологій необхідне всебічне розуміння взаємодії наночастинок з їх навколишнім середовищем, а монодисперсна і стабільна селекція наночастинок є одним із перших важливих кроків для зменшення будь-якої невизначеності в такій системі доставлення. У процесі приготування комбікормів для гідробіонтів наночастинок мікроелементів мають рівномірно розподілятися в загальній масі речовини і не втрачати своїх властивостей після технологічного оброблення. Siddhartha Singha з колегами зазначає, що наночастинок поживних речовин у процесі засвоєння мають вижити в кишковому середовищі до завершення всмоктування в епітеліальну тканину і надалі циркулювати разом з кров'ю до тканин-мішеней у фізіологічно визначеній кількості [27].

Дослідженням впливу наночастинок селену і селенметіоніну на продуктивність м'язової тканини і ферментативну активність займали-

ся вчені Xuxia Zhou, Yanbo Wang та інші. Експериментальну частину досліджень проводили на сріблястому карасі *Carassius auratus gibelio*. Було виявлено, що у риб дослідних груп за введення до комбікорму наночастинок селену і селенметіоніну спостерігався підвищений вміст селену в м'язових тканинах, підвищувався темп росту і кінцева маса. Окрім того, активувалась діяльність глутатіонпероксидази (GSH-Px) у плазмі та печінці порівняно з контролем [28].

Аналогічні результати отримали і науковці, які входили до групи наукових центрів Пакистану і Бразилії з вивчення впливу наночастинок селену на фізіологічні і біохімічні показники молоді *Torputitora*. *Torputitora*, або мандрівник *Putitor* – зниклий вид родини корошових, який мешкає у гірських річках та озерах у Гімалайському регіоні та Південній Азії [29]. Вони вводили в комбікорм наночастинок селеніту натрію (Se-NPs) в різних концентраціях. Було визначено, що дієтичні добавки Se-NPs в кількості 0,68 мг/кг мали найбільш сприятливий вплив на фізіолого-біохімічний стан ювенільних особин *Tor putitora* [30,31].

За введення наночастинок селенметіоніну в раціон молоді риб жовтохвостів *Seriola lalandi* було визначено його оптимальну концентрацію і рівень вмісту в кормі, за якого проявлялися токсичні ефекти (гістопатологічні зміни в печінці і селезінці) [32].

Позитивні результати щодо застосування наночастинок селену і оксиду цинку в раціонах риб було отримано в Центральному інституті прісноводних аквакультур (Бхубанешвар, Індія). Дослідження проводили на прісноводній рибі роду *Labeo rohita* родини корошових, яка є цінним об'єктом аквакультури в Індії, Центральній та Південно-східній Азії. Упродовж 120 діб рибу годували кормом з додаванням наночастинок оксиду цинку (ZnO) та селену (Se) для оцінювання впливу цих мікроелементів на ростові, імунологічні та ферментативні профілі. Порівняно з контрольною групою у дослідних риб, окрім значного збільшення інтенсивності росту, сироваткові ферментативні профілі, такі як активність лактатдегідрогенази та лужна фосфатаза, знижувались ($p < 0,05$) у дослідній групі, а активність супероксиддисмутази і ацетилхолінестерази підвищувались. Унаслідок зараження риб вірулентним бактеріальним штамом *Aeromonas hydrophila* відносна виживаність об'єктів дослідної групи була вищою ($60,00 \pm 8,82$ %) проти цього показника у риб контрольної групи ($45,00 \pm 6,17$ %). Отже, введення в комбікорм наночастинок селену і оксиду цинку стимулюють імунітет та підвищують

стійкість до бактеріальної інфекції у риб *Labeo rohita* [33].

Перспективним напрямом розвитку нанотехнологій є створення кон'югатів і композитів наночастинок металів з різними біологічно активними речовинами. Розроблення таких субстанцій дасть змогу більш ефективно їх використовувати завдяки розширенню спектра активності, що важливо за одночасної реалізації різних механізмів біологічної імуномодулювальної дії, можливості досягнення ефектів адитивного чи потенційованого синергізму.

У дослідженнях групи вчених Xia I. F. та ін. наночастинок селену, кон'юговані з хітозаном (CTS-SeNP), додавали в корм для риб *Danio rerio*. Кормова добавка CTS-SeNP посилювала активність лізоциму, фагоцитарний респіраторний вибух, а також проліферацію спленоцитів, яку стимулювали ліпополісахаридами (LPS) і конканаваліном А (ConA). Імуномодулювальний ефект був індукований через 3–9 діб і зберігався до 60 діб. Максимальний моделювальний ефект було встановлено за концентрації 10 мкг/л (у дослідних риб після внутрішньочеревного введення бактерії *Aeromonashydrophila* виживаність перевищувала контроль на 26,7 %) [34].

Імуномодулювальну функцію наноселену для гідробіонтів доведено і в інших дослідженнях. Група вчених під керівництвом Wang J. проводить дослідження зі створення багатofункціональних антиоксидантів, що поєднують властивості імуномодуляторів, і які можна розглядати як «модифікатори біологічної відповіді» для підтримання клітинного гомеостазу. Наночастинок селену можуть брати участь в універсальних функціях, тому ці властивості і механізми широко досліджуються [35].

Встановлено, що ядерний чинник транскрипції Nrf2, який належить до сімейства NF-E2, бере участь у протизапальному процесі, організовуючи контроль та регулюючи експресію генів за допомогою елемента антиоксидантної відповіді. Сигнальний шлях Keap1 (Kelch-подібний ECH-асоційований білок) / Nrf2 (NF-E2 p45-зв'язаний чинник 2) / ARE переважно регулює експресію антиоксидантних і протизапальних генів та інгібує процес запалення [36]. Отже, виявлення нових Nrf2-залежних протизапальних чинників, зокрема наночастинок, стало необхідним для створення препаратів з цим ефектом [37].

Для досягнення прогресу у виробництві аквакультури завдяки максимальному росту, поліпшенню здоров'я гідробіонтів та підвищенню якості продукції, необхідно оптимізувати склад кормів. Так, Durigon і Kunz, у своїх

дослідженнях на молоді тільпії оцінювали темпи росту, біохімічні, гематологічні та окиснювальні показники за введення до складу корму підвищених доз неорганічного селену (0,53, 0,86, 1,04 і 1,22 мг кг⁻¹). Вказані дози селену не вплинули на темп росту, біохімічні та гематологічні показники у дослідних риб, однак спричиняли збільшення небілкових тіолів та зменшення малонітрату діальдегіду, що свідчило про антиоксидантну дію селену [38].

Дослідженнями впливу різних доз наночастинок селену (нано-Se) на показники росту, конверсію корму, тканинний склад, накопичення селену в м'язах і печінці, антиоксидантну реакцію та біохімічні показники крові звичайного коропа *Cyprinus carpio* займалася група вчених під керівництвом Ashouri S. Нано-Se додавали в експериментальні базальні раціони в дозах 0 (контроль), 0,5, 1 і 2 мг/кг маси сухого корму. Риби, які споживали корм з додаванням селену в кількості 1 мг/кг⁻¹, мали покращені показники росту. Достовірної різниці за показником «конверсія корму» в усіх варіантах досліду не спостерігалось. Усі дослідні риби, порівнюючи з контролем, мали підвищений вміст Se в м'язах та тканинах печінки. Група риб, яка отримувала корм з додаванням 2 мг Se/кг⁻¹, мала підвищену активність аланінової амінотрансферази (ALT), порівнюючи з іншими експериментальними групами, та знижений рівень малонітрату діальдегіду. Статистично значущої різниці в активності сироваткової лужної фосфатази (ALP) серед дослідних груп не було виявлено. За результатами досліджень було розроблено рекомендації щодо оптимальної концентрації (1 мг нано-Se/кг⁻¹ корму) для покращення темпу росту та антиоксидантного захисту за вирощування коропа [39,40].

Можливий негативний вплив підвищених доз селену на гідробіонтів було підтверджено і в досліді Elia A. C. Серед досліджених тканин коропа в накопиченні Se переважно брали участь нирки та печінка, тимчасом м'язи мали низький рівень накопичення селену. Отже, споживання такої рибної продукції не мало загрози для здоров'я людини. Рівень селену в тканинах був у наступному порядку: нирки > печінка > м'язи. Ріст не був порушений, однак біохімічні антиоксидантні показники в печінці та нирках за підвищених доз селену в молодих особин вказували на присутність окиснювального стресу. Окрім того, рівні добавок селену, переважаючі рекомендовані концентрації, можуть погіршити антиоксидантний статус у коропа [41].

Для різних видів риб оптимальні дози селену, введені до раціону, можуть суттєво ва-

ріювати. Якщо у зазначених дослідженнях на коропі звичайному оптимальна концентрація становила 1 мг нано-Se/kg⁻¹ корму, і вищі значення цього показника негативно впливали на об'єкти досліджень, то досліди групи вчених Khalil H. S. та ін. на мальках сріблястого горбана *Argyrosomus regius* дали змогу їм рекомендувати для підвищення інтенсивності росту та економічної ефективності вирощування цього виду, додавання Se, виділеного із дріжджів у концентрації 3,98 мг/kg⁻¹ корму [42].

Racitti D. із співавторами рекомендують Sel-Plex (органічна форма селену, виділена із селенових дріжджів) як добавку кормів для об'єктів аквакультури з метою покращення загального стану риб та підвищення стійкості до імунних проблем. Доповнення раціонів форелі 4 мгSe/kg⁻¹ з використанням Sel-Plex значно поліпшувало реакцію риби на стимуляцію вірусом PAMP [43].

Дослідження з визначення оптимальних доз додавання частинок наноселену (0; 0,5; 1 і 2 мг/kg⁻¹ корму) для підвищення стійкості до стресу у пагра червоного *Pagrus Major* довели, що найбільш корисними були концентрації від 1 до 2 мг/kg⁻¹ корму [44].

Токсичний та екологічний вплив наночастинок мікроелементів на гідробіонтів і навколишнє середовище.

Потрапляння поживних речовин у вигляді наночастинок в організм об'єкта аквакультури може відбуватися за різних способів – додавання наночастинок мікроелементів у корм, насичення ними водного середовища, або безпосереднє введення їх у живий об'єкт. Для виробників і науковців рибогосподарської галузі важливим є визначити найбільш ефективний спосіб використання наночастинок поживних елементів. Проблемним питанням є негативний ефект використання наночастинок та концентрацій речовини для різних видів водних тварин і рослин. Традиційно для визначення токсичного ефекту використовують короткотривалі дослідження, які можуть не дати об'єктивної картини. Особливо щодо гідробіонтів, які є проміжною ланкою в харчовому ланцюзі, і накопичення мікроелементів в організмі, що були введені у вигляді наночастинок, та їх міграція в гідробіоценозі, що дотепер є маловивченим [45].

За використання наночастинок різних мікроелементів в аквакультурі необхідно враховувати, що вони мають бути нетоксичними не лише для самого біологічного об'єкта, а й для інших систем, які тісно пов'язані з ним його життєдіяльністю. Побудову екологічної моделі для визначення впливу наночастинок, що були

введені до тест-об'єкта, на навколишнє середовище проводять із використанням різних видів гідробіонтів – від найпростіших до хребетних [46]. Декоративні риби *Danio rerio* дають змогу за порівняно невисоких фінансових витрат отримати ефективні результати. Так, для порівняння токсичності між наноселеном і неорганічним селеном, Vaishnavi та інші науковці використовували цей вид риб на різних стадіях ембріонального і постембріонального розвитку. Результати довели, що збільшення концентрації NaSe і Inorg Se вплинуло на появу таких відхилень у розвитку як затримка росту, скорочення хоріону, набряк жовткового мішка, відсутність пігментації, деформація хвоста та сколіоз. Використання NaSe за концентрації 0,1 мг/л мало найкращий ефект для розвитку здорових ембріонів *Danio rerio* [47]. Група вчених з Іспанії, Італії та Ізраїлю використовувала у своїх дослідженнях ембріони *Danio rerio* для вивчення гострої сублетальної токсичності наночастинок різних металів (Ag, Au, CdS, ZnO, SiO₂) порівняно з їх йонними формами. За результатами, йонні форми металів були більш токсичними, ніж наноформи [48].

Водні рослини, як важливий елемент гідро-екосистем, мають бути обов'язково включені в оцінювання загального визначення позитивного або негативного впливу наночастинок на навколишнє середовище [49]. Для потрапляння наночастинок мікроелементів у водні рослини мікроорганізми їх вносять у різних концентраціях безпосередньо у воду. У такому разі важливо оцінити не лише вплив наночастинок на організм конкретного гідробіонта в природній водоймі, а й можливі ефекти для всіх живих елементів гідробіоценозу. Зелені водорості – група водних рослин, яка останнім часом стає новим інтересом для аквакультури [50].

Використання наночастинок у різних галузях промисловості і сільського господарства набуло широкого розповсюдження за останні 20 років. Зазвичай використовують наночастинки металів. Це сприяє підвищенню концентрації наночастинок мікроелементів у природному середовищі, а за використання нанотехнологій в аквакультурі – у природних водоймах [51]. Отже, важливим є вивчення впливу накопичених наноелементів у водному середовищі на водні живі ресурси [52].

Традиційними результатами токсичності Se є зниження росту, потреба в кормі і окиснювальний стрес, тимчасом пізніші дослідження вказують на порушення синтезу жирних кислот як основний механізм токсичної дії.

Для дослідження загального метаболічного режиму токсичної дії з акцентуванням на ліпід-

ний обмін Berntssen M. з групою вчених провів широке профілювання метаболічного шляху на атлантичному лососі *Salmosalar*, для чого було розроблено органічні та неорганічні раціони, збагачені Se. Атлантичний лосось харчувався органічним Se з низьким природним фоном (0,35 мг Se на кг⁻¹ живої ваги), збагаченим неорганічним селенітом або органічними селенометіонін-дріжджами на двох рівнях (1–2 або 15 мг Se на кг⁻¹ живої ваги), тричі на добу впродовж трьох місяців. Наявні побічні ефекти оцінювали за темпом росту, харчуванням, окиснювальним стресам та за оцінкою загального метаболічного шляху [53–56].

Kouba A., Velíšek та інші повідомили про результати досліджень з розроблення раціону на основі казеїну за вирощування барбусів *Barbusbarbus L.* Дослідні дієти були доповнені 0,3 мг кг⁻¹ Se із селеніту натрію, або 0,3 і 1,0 мг кг⁻¹ Se з біомаси хлорели. Проводили оцінювання загибелі, темпу росту, накопичення Se в м'язах і печінці, а також активність виділених ферментів у плазмі крові, м'язах, печінці і кишечнику. Різні концентрації селену в кормі не впливали на загибель і темп росту дослідних барбусів. Дослідження концентрації Se у м'язах і печінці, активність аланінамінотрансферази і креатинкірази в плазмі крові, глутатіонредуктази (GR) в м'язах, GRi каталази в м'язах і печінці дало змогу припустити, що селен, виділений із біомаси хлорели, легше накопичується і біологічно менш токсичний, ніж Se, отриманий із селеніту натрію [57].

Перевагою використання в аквакультурі органічних форм селену над неорганічними є те, що перші мають вищу біодоступність та краще накопичення в тканинах риб [58]. Верхньою межею концентрації органічного селену за додавання в корми є 0,2 мг/кг корму [59–62].

Щодо токсичності сполук селену у водоямах, у дослідженнях Kumar N. зі співавторами доведено, що смертельна концентрація селену і наноселену для пангасіуса *Pangasius hypophthalmus* становить 5,29 і 3,97 мг/л через 96 годин експозиції. Маркери антиоксидантного статусу, такі як активність каталази, супероксиддисмутази, глутатіон-S-трансферази, нейротрансмітерний фермент (AChE), маркери стресу (кортизол та білок теплового шоку HSP70), маркери гепатотоксичності аспартатамінотрансфераза, аланінамінотрансфераза, були значно підвищені, що, на думку авторів, може бути пов'язано з завищеною акумуляцією Se і NP у життєво важливих органах та тканинах-цілях, і підтверджено визначеними гістопатологічними змінами в печінці та зябрах [63].

Висновки. Розвиток аквакультури неможливий без використання наукових досягнень, основаних на розумінні проблем рибогосподарської галузі. Упровадження нанотехнологій у процес подолання негативної дії інтенсифікації виробництва продукції аквакультури на основі введення різних форм селену в раціони гідробіонтів, дасть змогу не лише підвищити продуктивність систем, а й сприятиме екологізації виробництва.

На основі проведеного аналізу використання світовими дослідниками різних форм селену за вирощування об'єктів аквакультури було визначено основні пріоритетні вимоги до походження наноселену, його концентрацій для того чи іншого виду та можливі негативні впливи на об'єкт вирощування і навколишнє середовище.

За використання наночастинок селену та інших мікроелементів в аквакультурі необхідно враховувати, що вони мають бути нетоксичними не лише для самого біологічного об'єкта, а й для інших систем, які тісно пов'язані з його життєдіяльністю. Отже, важливою є побудова екологічної моделі для визначення впливу наночастинок з використанням різних видів гідробіонтів – від найпростіших до хребетних.

Встановлено, що використання різних форм селену сприяє зниженню негативної дії окиснювального стресу у гідробіонтів. Введення до раціону наночастинок селену стимулює імунітет та підвищує стійкість до бактеріальних інфекцій у риб.

Перспективним є визначення оптимальних доз наночастинок селену для різних об'єктів аквакультури, оскільки концентрація селену в раціонах може варіювати в значних інтервалах залежно від виду і вікової групи. Враховуючи значний перелік видів гідробіонтів, які є об'єктами сучасної аквакультури, проведення досліджень за цим напрямом є актуальними. Водночас необхідно визначити вплив різних доз наноселену на показники росту, конверсію корму, тканинний склад, накопичення селену в м'язах і печінці, антиоксидантну реакцію та біохімічні показники крові.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shah B. R., Mraz J. Advances in nanotechnology for sustainable aquaculture and fisheries. Reviews in Aquaculture. 2020. Vol. 12(2). P. 925–942. Doi:https://doi.org/10.1111/raq.12356.
2. Aklakur Md., Rather A.M., Kumar N. Nanodelivery: an emerging avenue for Nutraceuticals and drug delivery. Crit Rev Food Sci Nutr. 2016. Vol. 56(14). P. 2352–2361. Doi:https://doi.org/10.1080/10408398.2013.839543
3. Kumari A., Yadav S.K. Nanotechnology in agri-food sector. Critical Reviews In Food Science and Nutrition. 2014.

- Vol. 54. P. 975–984. Doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.621095>.
4. Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges / S. M. Rodrigues et al. *Environmental Science*. 2017. Nano 4. P. 767–781. URL: https://scholar.google.com/scholar?cites=700762521879206503&as_sdt=2005&scioldt=0,5&hl=uk.
5. Perspectives of cerium nanoparticles use in agriculture / V. S. Bityutskyy et al. *The Animal Biology*. 2019. Vol. 19 (3). P. 9–17. Doi: <https://doi.org/10.15407/animbiol19.03.009>.
6. Influence of selenium on redox processes, selenoprotein metabolism and antioxidant status of aquaculture facilities / V. Bityutskyy et al. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2020. Вип. 114. С. 231–240. Doi: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.114.28>.
7. Enzyme-like activity of nanomaterials / V. S. Bityutskyy et al. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2018. Vol. 9(3). P. 469–476. Doi: <https://doi.org/10.15421/021870>.
8. Chen H., Seiber J. N., Hotze M. ACS select on nanotechnology in food and agriculture: A perspective on implications and applications. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 2014. Vol. 62(6). P. 1209–1212. Doi: <https://doi.org/10.1021/jf5002588>.
9. Fu P. P. Introduction to the special issue: Nanomaterials-toxicology and medical applications. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2014. Vol. 22(1). P. 1–2. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfda>.
10. Lu L., Wang X., Xiong C., Yao L. Recent advances in biological detection with magnetic nanoparticles as a useful tool. *Science China Chemistry*. 2015. Vol. 58(5). P. 793–809. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11426-015-5370-5>.
11. Li M., Zhang C. γ -Fe₂O₃ nanoparticle-facilitated bisphenol A degradation by white rot fungus. *Science Bulletin*. 2016. Vol. 61(6). P. 468–472. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1021-2>.
12. Maqsood A., AlSalhi M., Siddiqui M.K.J. Silver nanoparticle applications and human health. *Clinica Chimica Acta*. 2010. Vol. 411. P. 1841–1848. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cca.2010.08.016>.
13. Nanotechnology as a Novel Tool in Fisheries and Aquaculture Development: A Review / M. Ashraf et al. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2011. Vol. 2 (3). P. 258–261. Doi: <https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2011.02.03.2272>.
14. Nanotechnologies and environment: A review of pros and cons / O. S. Tsekhmistrenko et al. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10(3). P. 162–172. Doi: https://doi.org/10.15421/2020_149.
15. Bacterial synthesis of nanoparticles: Agreeen approach / S. Tsekhmistrenko et al. *Biosyst. Divers*. 2020. Vol. 28(1). P. 9–17. Doi: <https://doi.org/10.15421/012002>.
16. Evaluation of effects of selenium nanoparticles on *Bacillus subtilis* / N. Tymoshok et al. *Regul. Mech. Biosyst*. 2019. Vol. 10(4). P. 544–552. Doi: <https://doi.org/10.15421/021980>.
17. Цехмістренко О. С., Бітюцький В. С., Цехмістренко С. І. “Зелені” технології у синтезі наночастинок селену: матеріали І міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 28-29 травня 2020 р. Дніпро. 2020. Т. 2. 611 с.
18. Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: Modes of action and applications in formulating feed additives and food processing / M. Gopi et al. *Int. J. Pharmacol*. 2017. Vol. 13. P. 724–731. Doi: <https://doi.org/10.3923/ijp.2017.724.731>.
19. Nature Nanotechnology Release. Nanomaterials definition matters. *Nature Nanotechnology*. 2019. Vol. 14. 193 p. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0412-3>.
20. Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations / D. R. Boverhof et al. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2015. Vol. 73. P. 137–150. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.06.001>.
21. Selenium Nanoparticles for Stress-Resilient Fish and Livestock / S. Biplab et al. *Nanoscale Research Letters*. 2015. Vol. 10. 371 p. Doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1073-2>.
22. Apel K., Hirt H. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annual Review of Plant Biology*. 2004. Vol. 55. P. 373–379. Doi: <http://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>.
23. Glutathione peroxidase activity in the selenium-treated alga *Scenedesmus quadricauda* / M. Vítová et al. *Aquat. Toxicol*. 2011. Vol. 102. No. 1–2. P. 87–94. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.01.003>.
24. Mykhailenko N.F. Growth and photosynthetic activity of green algae *Chlorella vulgaris* Beijer in the presence of selenium nanoaqua-chelates. *Microbiology & Biotechnology*. 2016. Vol. 2. No. 34. P. 6–15. Doi: [http://doi.org/10.18524/2307-4663.2016.2\(34\).70746](http://doi.org/10.18524/2307-4663.2016.2(34).70746).
25. Selenium nanoparticles for stress-resilient fish and livestock / B. Sarkar et al. *Nanoscale research letters*. 2015. Vol. 10. No. 1. 371 p. Doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1073-2>.
26. Biogenic nanoselenium particles effectively attenuate oxidative stress-induced intestinal epithelial barrier injury by activating the Nrf2 antioxidant pathway / D. Song et al. *ACS applied materials & interfaces*. 2017. Vol. 9. No. 17. P. 14724–14740. Doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b03377>.
27. Singha S., Das K., Jha N. Nano-Systems for Micro-Nutrient Delivery in Aquaculture: A Critical Analysis. *Ann Aquac Res*. 2017. Vol. 4. No. 4. 1046 p. URL: <https://www.jscimedcentral.com/Aquaculture/aquaculture-4-1046.pdf>.
28. Xuxia Zhou., Yanbo Wang., Qing Gu., Weifen Li. Effects of different dietary selenium sources (selenium nanoparticle and selenomethionine) on growth performance, muscle composition and glutathione peroxidase enzyme activity of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*). *Aquaculture*. 2009. Vol. 291. No. 1–2. P. 78–81. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.03.007>.
29. Tor Putitora, the Extinct Fish Species in River Swat Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan / N. Akhtar et al. *World Journal of Fish and Marine Sciences*. 2016. Vol. 8. No. 1. P. 10–13. Doi: <https://doi.org/10.5829/idosi.wjfm.2016.8.1.10247>.
30. Effects of dietary selenium nanoparticles on physiological and biochemical aspects of juvenile Tor putitora / K. U. Khan et al. *Turk J Zool*. 2016. Vol. 40. P. 704–712. Doi: <https://doi.org/10.3906/zoo-1510-5>.
31. Synergistic effects of dietary nano selenium and vitamin C on growth, feeding, and physiological parameters of mahseer fish (*Tor putitora*) / K. U. Khan et al. *Aquaculture Reports*. 2017. Vol. 5. P. 70–75. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.01.002>.
32. Khosravi-Katuli K., Prato E., Lofrano G. Effects of nanoparticles in species of aquaculture interest. *Environ Sci*

- Pollut Res Int. 2017. Vol. 24. 17326 p. Doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9360>.
33. Effects of dietary zinc oxide and selenium nanoparticles on growth performance, immune responses and enzyme activity in rohu, *Labeo rohita* (Hamilton)/ P. Swain et al. *Aquacult Nut.* 2018. P. 1–9. Doi: <https://doi.org/10.1111/anu.12874>.
34. Dietary chitosan-selenium nanoparticle (CTS-SeNP) enhance immunity and disease resistance in zebrafish/ F. Xial et al. *Fish&shellfish immunology.* 2019. Vol. 87. P. 449–459. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.01.042>.
35. Wang J., Zhang Y., Yuan Y., Yue T. Immunomodulatory of selenium nano-particles decorated by sulfated *Ganoderma lucidum* polysaccharides. Food and chemical toxicology. 2014. Vol. 68. P. 183–189. URL: <http://ir.nsf.gov.cn/paperDownload/1000008779101.pdf>
36. Regulation of redox processes in biological systems with the participation of the Keap1/Nrf2/ARE signaling pathway, biogenic selenium nanoparticles as Nrf2 activators/ V. S. Bityutsky et al. *Regul. Mech. Biosyst.* 2020. Vol. 11. No. 4. Doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-405882-8.00004-0>.
37. Nrf2 signaling pathway: Pivotal roles in inflammation/ S. M. U. Ahmed et al. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease.* 2017. Vol. 1863. No. 2. P. 585–597. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2016.11.005>.
38. Diet selenium improves the antioxidant defense system of juveniles Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.)/ E. G. Durigon et al. *Brazilian Journal of Biology, (AHEAD).* 2018. Vol. 79. No. 3. Doi:<https://doi.org/10.1590/1519-6984.187760>.
39. Effects of different levels of dietary selenium nanoparticles on growth performance, muscle composition, blood biochemical profiles and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*)/ S. Ashouri et al. *Aquaculture.* 2015. Vol. 446. P. 25–29. Doi:<https://doi.org/10.1111/anu.12428>.
40. Effects of different dietary selenium sources (sodium selenite, selenomethionine and nanoselenium) on growth performance, muscle composition, blood enzymes and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*)/ S. Saffari et al. *Aquaculture nutrition.* 2017. Vol. 23. No. 3. P. 611–617. Doi: <https://doi.org/10.1111/anu.12428>.
41. Effects of selenium diets on growth, accumulation and antioxidant response in juvenile carp/ A. C. Elia et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 2011. Vol. 74. No. 2. P. 166–173. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.04.006>.
42. Khalil H. S., Mansour A. T., Goda A. M. A., Omar E. A. Effect of selenium yeast supplementation on growth performance, feed utilization, lipid profile, liver and intestine histological changes, and economic benefit in meagre, *Argyrosomus regius*, fingerlings. *Aquaculture.* 2019. Vol. 501. P. 135–143. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.018>.
43. Impact of selenium supplementation on fish antiviral responses: a whole transcriptomic analysis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed supranutritional levels of Sel-Plex®/ D. Pacitti et al. *BMC genomics.* 2016. Vol. 17. No. 1. 116 p. Doi:<https://doi.org/10.1186/s12864-016-2418-7>.
44. Dietary supplementation of selenium nanoparticles modulated systemic and mucosal immune status and stress resistance of red sea bream (*Pagrus major*)/ M. A. Dawood et al. *Fish physiology and biochemistry.* 2019. Vol. 45. No. 1. P. 219–230. Doi:<https://doi.org/10.1007/s10695-018-0556-3>.
45. Khosravi-Katuli K., Prato E., Lofrano G. Effects of nanoparticles in species of aquaculture interest. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2017. Vol. 24. 17326 p. Doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9360-3>.
46. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies/ J. C. M. Márquez et al.* 2018. Vol. 6. No. 2. P. 5–11. E-ISSN: 2347-5129 P-ISSN: 2394-0506.
47. Assessment of nano selenium effect in developing zebra fish embryos/ A.S. Vaishnavi et al. *Journal of Entomology and Zoology Studies.* 2019. Vol. 7. No. 1. P. 914–917. E-ISSN: 2320-7078 P-ISSN: 2349-6800.
48. Effects of metal-bearing nanoparticles (Ag, Au, CdS, ZnO, SiO₂) on developing zebrafish embryos/ J.M. Lacave et al. *Nanotechnology.* 2016. Vol. 27. No. 32. 325102 p. Doi:<https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/32/325102>.
49. Raza S., Hanif S., Tahir A. Role of nanotechnology in agriculture. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research.* 2017. Vol. 4. No. 5. P. 138–143. ISSN 2394-3211.
50. Röhder L.A. Interactions of Cerium Dioxide Nanoparticles with the Green Alga *Chlamydomonas Reinhardtii*: Influence of Physico-chemical Characteristics and Cerium(III). ETH-Zürich. 2014. 111 p. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.03.0>.
51. The effect of chronic silver nanoparticles on aquatic system in microcosms/ S. J. Hong et al. *Environmental Pollution.* 2017. Vol. 223. P. 395–402. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.036>.
52. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences/ A. Dobrochna et al.* 2018. Vol. 18. P. 781–788. Doi:https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18_6_04.
53. Sensitivity and toxic mode of action of dietary organic and inorganic selenium in Atlantic salmon (*Salmo salar*)/ M. H. G. Berntssen et al. *Aquatic toxicology.* 2017. Vol. 192. P. 116–126. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.09.014>.
54. Safe limits of selenomethionine and selenite supplementation to plant-based Atlantic salmon feeds/ M. H. Berntssen et al. *Aquaculture.* 2018. Vol. 495. P. 617–630. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.041>.
55. Selenium and selenium species in feeds and muscle tissue of Atlantic salmon/ V. Sele et al. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology.* 2018. Vol. 47. P. 124–133. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.005>.
56. Modulation of selenium tissue distribution and selenoprotein expression in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with graded levels of plant ingredients/ M. B. Betancor et al. *British Journal of Nutrition.* 2016. Vol. 115. No. 8. P. 1325–1338.
57. Supplementation with sodium selenite and selenium-enriched microalgae biomass show varying effects on blood enzymes activities, antioxidant response, and accumulation in common barbel (*Barbus barbus*)/ A. Kouba et al. *BioMed research international.* 2014. ID 408270, 8 p. Doi:<https://doi.org/10.1155/2014/408270>.
58. Fontagné-Dicharry S., Godin R., Le K. T., Fotedar R. Bioavailability of selenium from different dietary sources in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*). *Aquaculture.* 2014. Vol. 420. P. 57–62. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.10.034>.
59. EFSA, Scientific opinion on dietary reference values for selenium, EFSA J., Parma, Italy. 2014. 67 p.
60. EFSA, Scientific Opinion on Safety and Efficacy of Selenium in the Form of Organic Compounds Produced

by the Selenium-enriched Yeast *Saccharomyces Cerevisiae* NCYC R646 (Selemax 1000/2000) as Feed Additive for All Species, The European Food Safety Authority (EFSA) Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP), Parma, Italy. 2012. 17 p.

61. EFSA, Scientific opinion on safety and efficacy of Sel-Plex® (organic form of selenium produced by *saccharomyces cerevisiae* CNCM I-3060) for all species. The European Food Safety Authority (EFSA) Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). 2011. 52 p.

62. EFSA, Scientific opinion on the safety and efficacy of selenium in the form of organic compounds produced by the selenium-enriched yeast *Saccharomyces cerevisiae* NCYC R645 (SelenoSource AF 2000) for all species. The European Food Safety Authority (EFSA) Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). 2011. P. 15,57.

63. Kumar N., Krishnani K. K., Singh N. P. Comparative study of selenium and selenium nanoparticles with reference to acute toxicity, biochemical attributes, and histopathological response in fish. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. No. 9. P. 8914–8927. Doi:https://doi.org/10.1007/s11356-017-1165-x.

REFERENCES

1. Shah, B. R., Mraz, J. (2020). Advances in nanotechnology for sustainable aquaculture and fisheries. *Reviews in Aquaculture*. Vol. 12 (2), pp. 925–942. Available at:https://doi.org/10.1111/raq.12356.

2. Aklakur, Md., Rather, A.M., Kumar, N. (2016). Nanodelivery: an emerging avenue for Nutraceuticals and drug delivery. *Crit Rev Food Sci Nutr*. Vol. 56(14), pp. 2352–2361. Available at:https://doi.org/10.1080/10408398.2013.839543

3. Kumari, A., Yadav, SK. (2014). Nanotechnology in agri-food sector. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*. Vol. 54, pp. 975–984. Available at:https://doi.org/10.1080/10408398.2011.621095.

4. Rodrigues, S.M., Demokritou, P., Dokoozlian, N., Hendren, C.O., Karn, B., Mauter, M.S. (2017). Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science. Nano* 4, pp. 767–781. Available at:https://scholar.google.com/scholar?cites=700762521879206503 &as_sdt=2005&sciodt=0,5&hl=uk.

5. Bityutskyy, V. S., Tsekhmistrenko, O. S., Tsekhmistrenko, S. I., Spyvack, M. Y., Shadura, U. M. (2019). Perspectives of cerium nanoparticles use in agriculture. *The Animal Biology*. Vol. 19 (3), pp. 9–17. Available at:https://doi.org/10.15407/animbiol19.03.009.

6. Bityutskyy, V., Tsekhmistrenko, S., Tsekhmistrenko, O., Oleshko, O.A., Heiko, L.M. (2020). Influence of selenium on redox processes, selenoprotein metabolism and antioxidant status of aquaculture facilities. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Taurian Scientific Bulletin]. Silskohospodarski nauky [Agricultural sciences]*. Issue 114, pp. 231–240. Available at:https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.114.28.

7. 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*. Vol. 9(3), pp. 469–476. Available at:https://doi.org/10.15421/021870.

8. Chen, H., Seiber, J. N., Hotze, M. (2014). ACS select on nanotechnology in food and agriculture: A perspective on implications and applications. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 62(6), pp. 1209–1212. Available at:https://doi.org/10.1021/jf5002588.

9. Fu, P. P. (2014). Introduction to the special issue: Nanomaterials-toxicology and medical applications. *Journal of Food and Drug Analysis*. Vol. 22(1), pp. 1–2. Available at:https://doi.org/10.1016/j.jfda.

10. Lu, L., Wang, X., Xiong, C., Yao, L. (2015). Recent advances in biological detection with magnetic nanoparticles as a useful tool. *Science China Chemistry*. Vol. 58(5), pp. 793–809. Available at:https://doi.org/10.1007/s11426-015-5370-5.

11. Li, M., Zhang, C. (2016). γ -Fe₂O₃ nanoparticle-facilitated bisphenol A degradation by white rot fungus. *Science Bulletin*. Vol. 61(6), pp. 468–472. Available at:https://doi.org/10.1007/s11434-016-1021-2.

12. Maqsood, A., AlSalhi, M., Siddiqu, M.K.J. (2010). Silver nanoparticle applications and human health. *Clinica Chimica Acta*. Vol. 411, pp. 1841–1848. Available at:https://doi.org/10.1016/j.cca.2010.08.016

13. Ashraf, M., Aklakur, Md., Sharma, R., Ahmad, S., Khan, M. (2011). Nanotechnology as a Novel Tool in Fisheries and Aquaculture Development: A Review. *Iranian Journal of Energy & Environment*. Vol. 2 (3), pp. 258–261. Available at:https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2011.02.03.2272.

14. Tsekhmistrenko, O.S., Bityutskyy, V.S., Tsekhmistrenko, S.I., Kharchishin, V.M., Melnichenko, O.M., Rozputnyy, O.I., Malina, V.V., Prysiazniuk, N.M., Melnichenko, Y.O., Vered, P.I., Shulko, O.P., Onyshchenko, L.S. (2020). Nanotechnologies and environment: A review of pros and cons. *Ukrainian Journal of Ecology*. Vol. 10(3), pp. 162–172. Available at:https://doi.org/10.15421/2020_149.

15. Tsekhmistrenko, S., Bityutskii, V., Tsekhmistrenko, O., Horalskyi, L., Tymoshok, N., Spivak, M. (2020). Bacterial synthesis of nanoparticles: A green approach. *Biosyst. Divers*. Vol. 28(1), pp. 9–17. Available at:https://doi.org/10.15421/012002.

16. Tymoshok, N., Kharchuk, M., Kaplunenko, V., Bityutskii, V., Tsekhmistrenko, S., Tsekhmistrenko, O., Spivak, M., Melnichenko, Y. (2019). Evaluation of effects of selenium nanoparticles on *Bacillus subtilis*. *Regul. Mech. Biosyst*. Vol. 10(4), pp. 544–552. Available at:https://doi.org/10.15421/021980.

17. Tsekhmistrenko, O. S., Bityutskyy, V. S., Tsekhmistrenko, S. I. (2020). "Zeleni" tehnologii u syntezi nanochastynok selenu: materialy I mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' internet-konferencii, 28-29 travnja 2020 r ["Green" technologies in the synthesis of selenium nanoparticles: materials of the I International Scientific and Practical Internet Conference, May 28-29, 2020]. *Dnipro*, Vol. 2, 611 p.

18. Gopi, M., Pearlin, B., Kumar, R. D., Shanmathy, M., Prabakar, G. (2017). Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: Modes of action and applications in formulating feed additives and food processing. *Int. J. Pharmacol*. Vol. 13, pp. 724–731. Available at: https://doi.org/10.3923/ijp.2017.724.731.

19. Nature Nanotechnology Release. *Nanomaterials definition matters. Nature Nanotechnology*. (2019). Vol. 14, 193 p. Available at:https://doi.org/10.1038/s41565-019-0412-3.

20. Boverhof, D.R., Bramante, C.M., Butala, J.H., Clancy, S.F., Lafronconi, M., West, J. (2015). Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. Vol. 73, pp. 137–150. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.06.001>.
21. Biplab, S., Surajit, B., Akshay, D., Prosun, T., Krishnani, K. K., Minhas, P. S. (2015). Selenium Nanoparticles for Stress-Resilient Fish and Livestock. *Nanoscale Research Letters*. Vol. 10, 371 p. Available at: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1073-2>.
22. Apel, K., Hirt, H. (2004). Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. Annual Review of Plant Biology. Vol. 55, pp. 373–379. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>
23. Vítová, M., Bišová, K., Hlavová, M., Zachleder, V., Rucki, M., Čížková, M. (2011). Glutathione peroxidase activity in the selenium-treated alga *Scenedesmus quadricauda*. *Aquat. Toxicol.* Vol. 102, no. 1-2, pp. 87–94. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.01.003>.
24. Mykhailenko, N.F. (2016). Growth and photosynthetic activity of green algae *Chlorella vulgaris* Beijer in the presence of selenium nanoaqua-chelates. *Microbiology & Biotechnology*. Vol. 2, no. 34, pp. 6–15. Available at: [http://doi.org/10.18524/2307-4663.2016.2\(34\).70746](http://doi.org/10.18524/2307-4663.2016.2(34).70746).
25. Sarkar, B., Bhattacharjee, S., Daware, A., Tribedi, P., Krishnani, K. K., Minhas, P. S. (2015). Selenium nanoparticles for stress-resilient fish and livestock. *Nanoscale research letters*. Vol. 10, no. 1, 371 p. Available at: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1073-2>.
26. Song, D., Cheng, Y., Li X., Wang, F., Lu, Z., Xiao, X., Wang, Y. (2017). Biogenic nanoselenium particles effectively attenuate oxidative stress-induced intestinal epithelial barrier injury by activating the Nrf2 antioxidant pathway. *ACS applied materials & interfaces*. Vol. 9, no. 17, pp. 14724–14740. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b03377>.
27. Singha, S., Das, K., Jha, N. (2017). Nano-Systems for Micro-Nutrient Delivery in Aquaculture: A Critical Analysis. *Ann Aquac Res*. Vol. 4, no. 4, 1046 p. Available at: <https://www.jscimedcentral.com/Aquaculture/aquaculture-4-1046.pdf>.
28. Xuxia, Zhou., Yanbo, Wang., Qing, Gu., Weifen, Li. (2009). Effects of different dietary selenium sources (selenium nanoparticle and selenomethionine) on growth performance, muscle composition and glutathione peroxidase enzyme activity of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*). *Aquaculture*. Vol. 291, no. 1–2, pp. 78–81. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.03.007>.
29. Akhtar, N., Saeed, K., Khan, J.S., Khan, A., Akhtar, W., Akhtar, B. (2016). Tor Putitora, the Extinct Fish Species in River Swat Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *World Journal of Fish and Marine Sciences*. Vol. 8, no. 1, pp. 10–13. Available at: <https://doi.org/10.5829/idosi.wjfm.2016.8.1.10247>.
30. Khan, K.U., Zuber, A., Nazir, S., Fernandes, J.B.K., Jamil, Z., Sarwar, H. (2016). Effects of dietary selenium nanoparticles on physiological and biochemical aspects of juvenile Tor putitora. *Turk J Zool*. Vol. 40, pp. 704–712. Available at: <https://doi.org/10.3906/zoo-1510-5>.
31. Khan, K.U., Zuber, A., Nazir, S., Ullah, I., Zeenat, J., Sarwar, H. (2017). Synergistic effects of dietary nano selenium and vitamin C on growth, feeding, and physiological parameters of mahseer fish (*Tor putitora*). *Aquaculture Reports*. Vol. 5, pp. 70–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.01.002>.
32. Khosravi-Katuli, K., Prato, E., Lofrano, G. (2017). Effects of nanoparticles in species of aquaculture interest. *Environ Sci Pollut Res Int*. Vol. 24, 17326 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9360>.
33. Swain, P., Das, R., Das, A., Padhi, S.K., Das, K.C., Mishra, S.S. (2018). Effects of dietary zinc oxide and selenium nanoparticles on growth performance, immune responses and enzyme activity in rohu, *Labeo rohita* (Hamilton). *Aquacult. Nut.* pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1111/anu.12874>.
34. Xia, I. F., Cheung, J. S., Wu, M., Wong, K. S., Kong, H. K., Zheng, X. T., Kwok, K.W. (2019). Dietary chitosan-selenium nanoparticle (CTS-SeNP) enhance immunity and disease resistance in zebrafish. *Fish&shellfish immunology*. Vol. 87, pp. 449–459. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.01.042>.
35. Wang, J., Zhang, Y., Yuan, Y., Yue, T. (2014). Immunomodulatory of selenium nano-particles decorated by sulfated *Ganoderma lucidum* polysaccharides. *Food and chemical toxicology*. Vol. 68, pp. 183–189. Available at: <http://ir.nsf.gov.cn/paperDownload/1000008779101.pdf>.
36. Bityutsky, V. S., Tsekhmistrenko, S. I., Tsekhmistrenko, O. S., Tymoshok, N. O., Spivak, M.Y. (2020). Regulation of redox processes in biological systems with the participation of the Keap1/Nrf2/ARE signaling pathway, biogenic selenium nanoparticles as Nrf2 activators. *Regul. Mech. Biosyst*. Vol. 11, no. 4. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-405882-8.00004-0>.
37. Ahmed, S. M. U., Luo, L., Namani, A., Wang, X. J., Tang, X. (2017). Nrf2 signaling pathway: Pivotal roles in inflammation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease*. Vol. 1863, no. 2, pp. 585–597. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2016.11.005>.
38. Durigon, E. G., Kunz, D. F., Peixoto, N. C., Uczay, J., Lazzari, R. (2018). Diet selenium improves the antioxidant defense system of juveniles Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Brazilian Journal of Biology, (AHEAD)*. Vol. 79, no. 3. Available at: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.187760>.
39. Ashouri, S., Keyvanshokoo, S., Salati, A. P., Johari, S. A., Pasha-Zanoosi, H. (2015). Effects of different levels of dietary selenium nanoparticles on growth performance, muscle composite *Aquaculture*. Vol. 446, pp. 25–29. Available at: <https://doi.org/10.1111/anu.12428>.
40. Saffari, S., Keyvanshokoo, S., Zakeri, M., Johari, S. A., Pasha-Zanoosi, H. (2017). Effects of different dietary selenium sources (sodium selenite, selenomethionine and nanoselenium) on growth performance, muscle composition, blood enzymes and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture nutrition*. Vol. 23, no. 3, pp. 611–617. Available at: <https://doi.org/10.1111/anu.12428>.
41. lia, A. C., Prearo, M., Pacini, N., Dörr, A. J. M., Abete, M. C. (2011). Effects of selenium diets on growth, accumulation and antioxidant response in juvenile carp. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 74, no. 2, pp. 166–173. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.04.006>.
42. Khalil, H. S., Mansour, A. T., Goda, A. M. A., Omar, E. A. (2019). Effect of selenium yeast supplementation on growth performance, feed utilization, lipid profile, liver and intestine histological changes, and economic benefit in

- meagre, *Argyrosomus regius*, fingerlings. *Aquaculture*. Vol. 501, pp. 135–143. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.018>.
43. Pacitti, D., Lawan, M. M., Feldmann, J., Sweetman, J., Wang, T., Martin, S. A. M., Secombes, C. J. (2016). Impact of selenium supplementation on fish antiviral responses: a whole transcriptomic analysis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed supranutritional levels of Sel-Plex®. *BMC genomics*. Vol. 17, no. 1, 116 p. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2418-7>.
44. Dawood, M. A., Koshio, S., Zaineldin, A. I., Van Doan, H., Moustafa, E. M., Abdel-Daim, M. M., Hassaan, M. S. (2019). Dietary supplementation of selenium nanoparticles modulated systemic and mucosal immune status and stress resistance of red sea bream (*Pagrus major*). *Fish physiology and biochemistry*. Vol. 45, no. 1, pp. 219–230. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10695-018-0556-3>.
45. Khosravi-Katuli, K., Prato, E., Lofrano, G. (2017). Effects of nanoparticles in species of aquaculture interest. *Environ Sci Pollut Res Int*. Vol. 24, 17326 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9360-3>.
46. Márquez, J. C. M., Partida, A. H., Dosta, M. C. M., Mejía, J. C. Martínez, J. A. B. (2018). *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. Vol. 6, no. 2, pp. 5–11. E-ISSN: 2347-5129 P-ISSN: 2394-0506.
47. Vaishnavi, A.S., Mangala Gowri, A., Valli, C., Meenambigai, T.V., Baskaran, D. (2019). Assessment of nano selenium effect in developing zebra fish embryos. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. Vol. 7, no. 1, pp. 914–917. E-ISSN: 2320-7078 P-ISSN: 2349-6800.
48. Lacave, J.M., Retuerto, A., Vicario-Parés, U., Gilliland, D., Oron, M., Cajaraville, M.P., Orbea, A. (2016). Effects of metal-bearing nanoparticles (Ag, Au, CdS, ZnO, SiO₂) on developing zebrafish embryos. *Nanotechnology*. Vol. 27, no. 32, 325102 p. Available at: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/32/325102>.
49. Raza, S., Hanif, S., Tahir, A. (2017). Role of nanotechnology in agriculture. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*. Vol. 4, no. 5, pp. 138–143. ISSN 2394-3211.
50. Röhder, L.A. (2014). Interactions of Cerium Dioxide Nanoparticles with the Green Alga *Chlamydomonas Reinhardtii*: Influence of Physico-chemical Characteristics and Cerium(III). ETH-Zürich. 111 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.03.0>.
51. Hong, S. J., Liyan, Y., Ren, N., N., Ling, X., Suting, Z., Wei, L., Gontero, B. (2017). The effect of chronic silver nanoparticles on aquatic system in microcosms. *Environmental Pollution*. Vol. 223, pp. 395–402. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.036>.
52. Dobrochna, A., Jerzy, Ś., Teresa, O., Magda, F., Małgorzata, R., Yuichiro, M., Kacper, M. (2018). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 18, pp. 781–788. Available at: https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18_6_04.
53. Berntssen, M. H. G., Sundal, T. K., Olsvik, P. A., Amlund, H., Rasinger, J. D., Sele, V., Ørnsrud, R. (2017). Sensitivity and toxic mode of action of dietary organic and inorganic selenium in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquatic toxicology*. Vol. 192, pp. 116–126. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.09.014>.
54. Berntssen, M. H., Betancor, M., Caballero, M. J., Hillestad, M., Rasinger, J., Hamre, K., Ørnsrud, R. (2018). Safe limits of selenomethionine and selenite supplementation to plant-based Atlantic salmon feeds. *Aquaculture*. Vol. 495, pp. 617–630. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.041>.
55. Sele, V., Ørnsrud, R., Sloth, J. J., Berntssen, M. H., Amlund, H. (2018). Selenium and selenium species in feeds and muscle tissue of Atlantic salmon. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. Vol. 47, pp. 124–133. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.005>.
56. Betancor, M. B., Dam, T. M., Walton, J., Morken, T., Campbell, P. J., Tocher, D. R. (2016). Modulation of selenium tissue distribution and selenoprotein expression in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with graded levels of plant ingredients. *British Journal of Nutrition*. Vol. 115, no. 8, pp. 1325–1338.
57. Kouba, A., Velíšek, J., Stará, A., Masojádek, J., Kozák, P. (2014). Supplementation with sodium selenite and selenium-enriched microalgae biomass show varying effects on blood enzymes activities, antioxidant response, and accumulation in common barbel (*Barbus barbus*). *BioMed research international*. ID 408270, 8 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2014/408270>.
58. Fontagné-Dicharry, S., Godin, R., Le, K. T., Fotedar, R. (2014). Bioavailability of selenium from different dietary sources in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*). *Aquaculture*. Vol. 420, pp. 57–62. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.10.034>.
59. EFSA, Scientific opinion on dietary reference values for selenium, EFSA J., Parma, Italy. (2014). 67 p.
60. EFSA, Scientific Opinion on Safety and Efficacy of Selenium in the Form of Organic Compounds Produced by the Selenium-enriched Yeast *Saccharomyces Cerevisiae* NCYC R646 (Selemax 1000/2000) as Feed Additive for All Species, The European Food Safety Authority (EFSA) Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP), Parma, Italy. (2012). 17 p.
61. EFSA, Scientific opinion on safety and efficacy of Sel-Plex® (organic form of selenium produced by *saccharomyces cerevisiae* CNCM I-3060) for all species. The European Food Safety Authority (EFSA) Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). (2011). 52 p.
62. EFSA, Scientific opinion on the safety and efficacy of selenium in the form of organic compounds produced by the selenium-enriched yeast *Saccharomyces cerevisiae* NCYC R645 (SelenoSource AF 2000) for all species. The European Food Safety Authority (EFSA) Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). (2011). pp. 15,57.
63. Kumar, N., Krishnani, K. K., Singh, N. P. (2018). Comparative study of selenium and selenium nanoparticles with reference to acute toxicity, biochemical attributes, and histopathological response in fish. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 25, no. 9, pp. 8914–8927. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1165-x>.

Использование различных форм селена в аквакультуре

Олешко А.А., Битюцкий В.С., Мельниченко А.Н., Гейко Л.Н.

Обобщены исследования научной литературы по использованию методов нанотехнологии при выращивании

различных объектов аквакультуры, которые основаны на добавлении в рационы селена различных форм и происхождения. Подчеркнуто, что современные научные исследования по использованию наночастиц в аквакультуре направлены на точность доставки и соответствующее количество микроэлементов, что в дальнейшем может повлиять на снижение себестоимости продукции аквакультуры.

Указано, что необходимо учитывать специфику современных промышленных технологий аквакультуры, при которых водные организмы выращиваются по высокой плотности посадки в бассейнах, то есть постоянно находятся в условиях стресса, а одной из наиболее распространенных форм стресса, которая приводит к снижению производительности в области аквакультуры, является окислительный стресс. В обзоре отмечено, что селен является одним из важных микронутриентов, который может снижать негативное воздействие окислительного стресса.

Проанализированы исследования ряда авторов относительно положительного влияния добавления различных форм селена в рационы основных объектов аквакультуры. Определено, что биологически синтезированный наноселен можно добавлять в различные коммерческие рыбные корма для повышения стрессоустойчивости и производительности, также этот продукт будет соответствовать экологическим потребностям потребителей.

Установлено преимущество использования в аквакультуре органических форм селена перед неорганическими, поскольку первые имеют более высокую биодоступность и лучше накопления в тканях рыб.

Проанализировано ряд исследований, связанных с определением токсического действия различных форм селена и его концентраций на гидробионтов. При этом подчеркивается, что в аквакультуре необходимо учитывать, что частицы селена должны быть нетоксичными не только для самого биологического объекта, но и для других систем, которые тесно связаны с ним его жизнедеятельностью.

Ключевые слова: селен, нанотехнологии, аквакультура, рыбы, стрессоустойчивость, токсичность, темп роста, физиологические показатели, иммунологические показатели.

The use of various forms of selenium in aquaculture Oleshko O., Bityutsky V., Melnichenko O., Geiko L.

A study of the scientific literature on the use of nanotechnology methods for the cultivation of various aquaculture facilities has been generalized. The study was based on the addition of selenium to the diets of various shapes and origins. It is emphasized that modern scientific research on the use of nanoparticles in aquaculture emphasizes the accuracy of delivery and the appropriate number of trace elements, which in turn may reduce the cost of aquaculture products.

It is pointed out that it is necessary to take into account the specifics of modern industrial aquaculture technologies, in which aquatic organisms are grown at high planting densities in pools, that means are constantly under stress, and one of the most common forms of stress leading to reduced productivity in aquaculture is oxidative stress. The review noted that selenium is one of the important micronutrients that can reduce the negative effects of oxidative stress.

Studies by a number of authors on the positive effects of adding various forms of selenium to the diets of major aquaculture facilities have been analyzed. It is determined that biologically synthesized nanoselenium can be added to various commercial fish feeds to increase stress resistance and productivity of aquatic organisms, in addition, this product will meet the environmental needs of consumers.

The advantage of using organic forms of selenium in aquaculture over inorganic ones has been established, as the former have higher bioavailability and better accumulation in fish tissues.

A number of studies related to the determination of the toxic effects of various forms of selenium and its concentrations on aquatic organisms have been studied. It is emphasized that in aquaculture it is necessary to take into account that selenium particles must be non-toxic not only for the biological object itself, but also for other systems that are closely related to its vital activity.

Key words: selenium, nanotechnology, aquaculture, fish, stress resistance, toxicity, growth rate, physiological indicators, immunological indicators.



Copyright: Олешко О.А. 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.



Олешко О.А.

ID <https://orcid.org/0000-0001-9190-0861>

Бітюцький В.С.

ID <https://orcid.org/0000-0002-2699-3974>

Мельниченко О.М.

ID <https://orcid.org/0000-0001-5462-508X>

Гейко Л.М.

ID <https://orcid.org/0000-0002-6763-5006>