

Обзорная статья  
УДК 639.3.043  
doi: 10.33284/2658-3135-106-1-21

**Обзор метааналитических эмпирических данных использования наночастиц  
эссенциальных элементов в аквакультуре**

**Елена Петровна Мирошникова<sup>1</sup>, Алексей Николаевич Сизенцов<sup>2</sup>, Азамат Ерсанович Аринжанов<sup>3</sup>,  
Юлия Владимировна Килякова<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

<sup>1</sup>elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

<sup>2</sup>asizen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1099-3117>

<sup>3</sup>arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

<sup>4</sup>fish-ka06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2385-264X>

**Аннотация.** Поиск альтернативных биологически активных соединений в качестве замены кормовым антибиотикам, химиотерапевтическим антимикробным и противоопухолевым препаратам способствует интенсивному развитию научных направлений в области фитотерапии и нанотехнологии. Высокий потенциал использования фитобиотиков в качестве антимикробных препаратов, стимуляторов роста, антиоксидантной, ферментативной и иммунологической активности изучается всесторонне на протяжении последних десятилетий. Нанотехнология является относительно молодым, интенсивно развивающимся научным направлением, занимающимся не только синтезом, но и практическим использованием новых материалов. Отдельно стоит отметить высокий уровень интереса исследователей различных стран в области направленного «зелёного» синтеза ультрадисперсных частиц, так, результат запроса <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=green+nanoparticle+synthesis> выдаёт более 1000 научных обзорных и экспериментальных статей, датирующихся преимущественно в диапазоне от 2017 до 2022 года. В том числе большое количество работ посвящено использованию различных соединений эссенциальных элементов в виде солей, УДЧ, полученных физическим и химическим способами, а также методом направленного «зелёного» синтеза с использованием экстрактов растений в кормлении гидробионтов. Большинство исследователей сходится во мнении, что такой способ является экологически безопасным, методически простым в выполнении и обеспечивает выход биологически активных соединений, включающих в свою структуру наноразмерные частицы металлов. Использование таких соединений в аквакультуре, согласно метааналитическим данным, обеспечивает повышение показателей интенсивности роста, снижение коэффициента конверсии корма, увеличивает ферментативную, антиоксидантную и иммунологическую активность, повышая уровень выживаемости и устойчивости к воздействию неблагоприятных факторов внешней среды.

**Ключевые слова:** направленный «зелёный» синтез ультрадисперсных частиц, наночастицы, метааналитические данные, эссенциальные элементы, аквакультура, кормление рыб

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-00281.

**Для цитирования:** Обзор метааналитических эмпирических данных использования наночастиц эссенциальных элементов в аквакультуре / Е.П. Мирошникова, А.Н. Сизенцов, А.Е. Аринжанов, Ю.В. Килякова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 1. С. 21-34. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-21>

Review article

**Review of meta-analytic empirical data on the use of essential element nanoparticles  
in aquaculture**

**Elena P Miroshnikova<sup>1</sup>, Alexei N Sizentsov<sup>2</sup>, Azamat E Arinzhanov<sup>3</sup>, Yulia V Kilyakova<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Orenburg State University, Orenburg, Russia

<sup>1</sup>elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

<sup>2</sup>asizen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1099-3117>

<sup>3</sup>arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

<sup>4</sup>fish-ka06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2385-264X>

**Abstract.** The search for alternative biologically active compounds, as a replacement for feed antibiotics, chemotherapeutic antimicrobial and antitumor drugs, contributes to the intensive development of

scientific areas in the field of phytotherapy and nanotechnology. The high potential of using phytobiotics as antimicrobials, growth promoters, antioxidant, enzymatic and immunological activities has been studied comprehensively over the past decades. Nanotechnology is a relatively young, intensively developing scientific area that deals not only with the synthesis but also with the practical use of new materials. Separately, it is worth noting the high level of interest of researchers from various countries in the field of directed «green» synthesis of ultrafine particles, for example, the result of the request <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=green+nanoparticle+synthesis> produces more than 1000 scientific review and experimental articles dating predominantly from 2017 to 2022. In particular, a large number of works are devoted to the use of various compounds of essential elements in the form of salts, UFP obtained by physical and chemical methods, as well as by the method of directed «green» synthesis using plant extracts in feeding hydrobionts. Most researchers agree that this method is environmentally safe, methodologically simple to perform, and provides the yield of biologically active compounds that include nanosized metal particles in their structure. The use of such compounds in aquaculture, according to meta-analytical data, provides an increase in growth rates, a decrease in the feed conversion rate, an increase in enzymatic, antioxidant and immunological activity, increasing the level of survival and resistance to adverse environmental factors.

**Keywords:** targeted «green» synthesis of ultrafine particles, nanoparticles, meta-analytical data, essential elements, aquaculture, fish feeding

**Acknowledgments:** the work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-26-00281.

**For citation:** Miroschnikova EP, Sizentsov AN, Arinzhanov AE, Kilyakova YuV. Review of meta-analytic empirical data on the use of essential element nanoparticles in aquaculture. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(1):21-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-21>

## **Введение.**

Интенсивное мировое развитие коммерческой аквакультуры за последние десятилетия стало источником более 50 % потребляемой рыбы (Naderi M et al., 2017). Адаптация современной рыбоводческой отрасли обусловлена использованием технологий, обеспечивающих устойчивое развитие аквакультуры за счёт строгого контроля качества кормов, что в свою очередь способствует не только увеличению рыбоводно-биологических показателей рыб, но и поддержанию качества воды (Khan MZH et al., 2020). При этом следует отметить, что беспорядочная утилизация необработанных или ненадлежащим образом обработанных отходов и сточных вод из различных источников, включая производственные предприятия, секторы пищевой промышленности и здравоохранения, приводит к выбросу в окружающую среду различных загрязняющих веществ, таких как биологически активные соединения и неметаболизированные антибиотики (Iwu CD et al., 2020).

Бактерицидные вещества, особенно антибиотики (Hossain A et al., 2022; Chen J et al., 2020), могут оказывать существенное влияние на водную экосистему из-за их широкого использования в аквакультуре, что в свою очередь приводит к различным токсикологическим воздействиям на водные организмы, а также к длительному сохранению в окружающей среде и способности опосредованно влиять на развитие вирулентности условно патогенных штаммов в организме человека через пищевую цепь (Liu Y et al., 2022).

В настоящее время изучаются различные способы, направленные на повышение производительности и эффективности устойчивого развития аквакультуры (Okeke ES et al., 2022). Нанотехнология является стремительно развивающейся отраслью во всём мире и в настоящее время стала повсеместным инструментом для решения различных проблем аквакультуры, таких как кормление рыб (Behera T et al., 2014), управление качеством воды и лечение болезней различной этиологии. Одним из основных критериев практического использования наночастиц металлов-микроэлементов является коррекция элементного статуса, что в свою очередь обеспечивает повышение устойчивости рыбы к стрессу, увеличение динамических характеристик интенсивности роста, сопротивляемость негативного воздействия условно-патогенной и патогенной флоры и ряда других показателей аквакультуры.

**Цель исследования.**

Провести метааналитический обзор эмпирических данных методических подходов направленного «зелёного» синтеза наночастиц и их использования в качестве кормовых добавок на различных представителях аквакультуры.

**Результаты исследования.**

**Международный опыт использования наночастиц металлов, полученных различными методами (физические, химические, биологические) в аквакультуре.**

Библиометрические данные свидетельствуют о высоком уровне научного интереса не только к конструированию (способу получения), но и практическому применению наночастиц (НЧ), таких как НЧ железа на модели *Trichogaster trichopterus* (Paulpandian P et al., 2023), НЧ цинка на *Oreochromis niloticus* (Ghazi S et al., 2022; Kurian A and Elumalai P, 2021; Diab AM et al., 2022), *Pangasius hypophthalmus* (Kumar N et al., 2017), *Litopenaeus vannamei* (Yang J et al., 2022), *Oncorhynchus mykiss* (Shahpar Z and Johari SA, 2019), *Labeo rohita* (Thangapandiyan S and Monika S, 2020), НЧ марганца и НЧ магния на *Macrobrachium rosenbergii* (Asaikkutti A et al., 2016; Srinivasan V et al., 2017), НЧ хрома на *Macrobrachium rosenbergii* и *Pangasianodon hypophthalmus* (Satgurunathan T et al., 2019; Akter S et al., 2021), НЧ селена на *Cyprinus carpio* (Ashouri S et al., 2015), *Macrobrachium rosenbergii* (Satgurunathan T et al., 2022), *Pangasius hypophthalmus* (Kumar N et al., 2018; Kumar N and Singh NP, 2019; Kumar N et al., 2021), *Oreochromis niloticus* (Ghaniem S et al., 2022; Rathore SS et al., 2021), *Oncorhynchus mykiss* (Yanez-Lemus F et al., 2022), НЧ меди на *Macrobrachium rosenbergii* (Muralisankar T et al., 2016), НЧ кобальта *Tor putitora* (Younus N and Zuberi A, 2022; Younus N et al., 2020).

Общим критерием проводимых исследований по использованию наночастиц эссенциальных элементов является их высокий биологический потенциал, обеспечивающий увеличение продуктивности роста, повышение антиоксидантной и иммунологической активности организма, а также повышение уровня резистентности в отношении патогенных микроорганизмов.

Физиологическая значимость металлов-микроэлементов неоспорима и подтверждается многочисленными исследованиями. Функциональные характеристики данных элементов обусловлены разнообразными биологическими процессами как на клеточном уровне, так и на уровне организма в условиях интенсивно развивающейся аквакультуры. Так, например, цинк является одним из основных микроэлементов, участвующих в нескольких функциях в организме животного. Он активизирует функцию метаболизма, синтез основных ферментов и образование гормонов, связанных с ростом, размножением, иммунитетом и антиоксидантной ролью у гидробионтов. В аквакультуре регулярно применяются несколько источников цинка, включая неорганические, органические и наноформу. Во многих исследованиях изучалось влияние добавок цинка в рационы гидробионтов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что цинк может быть использован как биологически активная добавка. При этом следует учитывать размеры наночастиц, их дозировки, способы получения, продолжительности кормления и ряд других факторов (Dawood MAO et al., 2022; Rohani MF et al., 2022).

Другим, не менее важным элементом, является медь. Она необходима для оптимального роста и поддержания гомеостаза организма рыб. Медь обеспечивает разнообразные биологические, физиологические и метаболические функции организма, например, она является кофактором для ряда ферментов, участвующих в антиоксидантной защите и образовании металлоферментов (Dawood MAO, 2022).

Одним из наиболее важных аспектов использования наночастиц является их высокое отношение поверхности к объёму, что в свою очередь обеспечивает более высокие реакционноспособные характеристики, чем объёмные материалы, поскольку атомы на поверхности, как правило, более активны, чем атомы в центре. В современных условиях синтез наночастиц осуществляется с использованием физических, химических или биологических методов. Различные физико-химические методы, такие как гидротермальный, золь-гель синтез, лазерная абляция, литография и др., требуют специального оборудования и квалифицированных специалистов. Помимо этого, они

способны вызывать токсическое действие, опасное для здоровья. Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что наночастицы, полученные методом направленного «зелёного» синтеза, являются экономически эффективными, нетоксичными и биоразлагаемыми по своей природе. Этот экологически чистый метод синтеза снижает использование опасных веществ, поскольку в процессе используются натуральные материалы, такие как листья, корни и экстракты цветов, а также микроорганизмы, такие как бактерии, грибки, водоросли и т. д. (Jayachandran A et al., 2021; Al Jabri H et al., 2022).

#### Направленный синтез «зелёных» наночастиц с использованием экстрактов растений (методические подходы и используемое сырьё).

Следует отметить, что различные фитохимические вещества, присутствующие в растительном экстракте, могут действовать как восстановители для преобразования предшественников металлов в наночастицы металлов. К данной категории веществ относятся терпеноиды, флавоноиды, фенольные соединения, альдегиды и алкалоиды, которые вносят свой вклад в процесс восстановления. Также в процессе «зелёного» синтеза необходимо учитывать уровень содержания фитохимических восстанавливающих агентов в различных частях растений, pH, температуру, время контакта, концентрацию солей металлов и фитохимический профиль растительного экстракта, все эти факторы влияют на синтез, стабилизацию и количество образующихся наночастиц (Jayachandran A et al., 2021).

Простота выполнения и минимальный уровень аппаратного сопровождения методики направленного синтеза «зелёных» наночастиц с использованием экстрактов растений способствуют существенному снижению себестоимости конечного продукта (рис. 1).

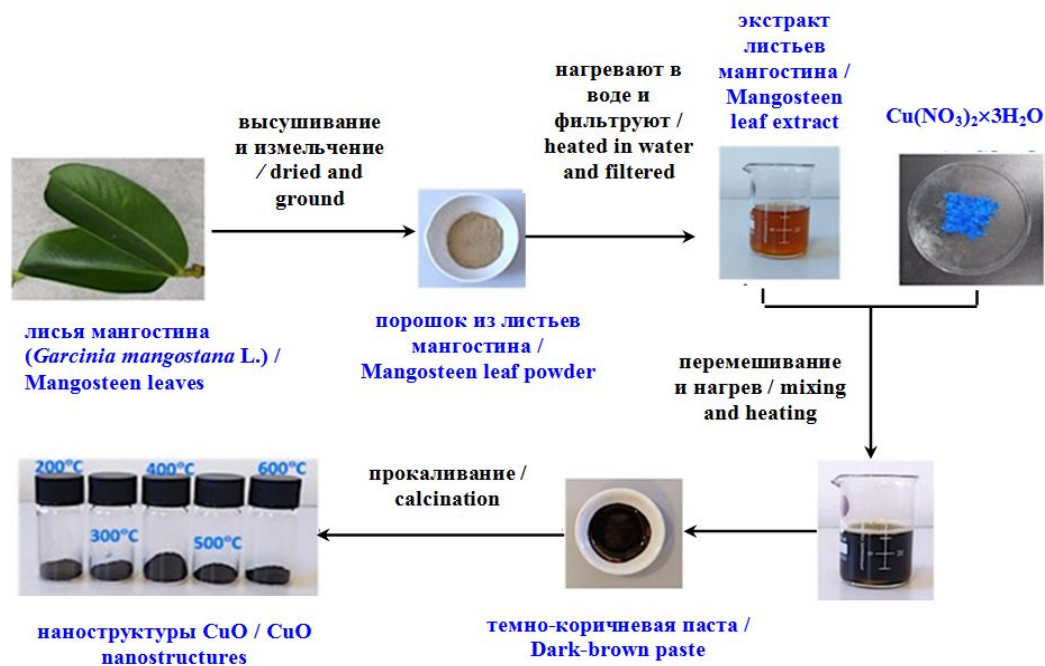


Рис. 1 – Экспериментальная процедура «зелёного» синтеза наноструктур CuO с использованием водного экстракта листьев *Garcinia mangostana L.* (Chan YB et al., 2022)

Figure 1 – Experimental procedure for the «green» synthesis of CuO nanostructures using an aqueous extract of *Garcinia mangostana L.* leaves (Chan YB et al., 2022)

Так, для большинства предлагаемых методик используют водные растворы (отвары и настои), которые после предварительной температурной обработки (от +60 °C до +100 °C) в течение времени (от 20 минут до 4 часов) подвергали фильтрованию. В качестве прекурсора использу-

ются различные соли элементов, обладающих высоким уровнем диссоциации в водных растворах в концентрациях (водные растворы на основе дистиллированной воды) от 1 мМ/л до 10 мМ/л. Так, например, в качестве исходного растительного сырья для биологического синтеза наночастиц цинка исследователями предлагаются различные лекарственные соединения, такие как кайратия (*Cayratia pedata*) (Jayachandran A et al., 2021), капуста огородная (*Brassica oleracea L.*) (Osuntokun J et al., 2019), мангостан (*Garcinia mangostana*) (Aminuzzaman M et al., 2018), молочай черешковый (*Euphorbia petiolata*) (Mohammadi C et al., 2017), гранат обыкновенный (*Punica granatum L.*) (Fuku X et al., 2016), дерево дхоби (*Mussaenda frondosa L.*) (Jayappa MD et al., 2020), андрографис метельчатый (*Andrographis paniculata*) (Rajeshkumar S et al., 2021), листья папайи (*Carica papaya L.*) (Alam MW et al., 2022), банан (*Musa Paradisiaca*) и чай ройбуш (*Aspalathus linearis* (rooibos) leaf extract) (Lyimo GV et al., 2022). При этом следует отметить, что синтезированные наночастицы обладают высоким уровнем антибактериальной активности.

Независимо от метода синтеза наночастиц необходимо проведение дополнительных блоков экспериментальных исследований, направленных на оценку морфометрических характеристик получаемого материала. Для реализации данного этапа исследователями предлагается использование: спектроскопии в ультрафиолетовой и видимой областях (UV-vis), порошковой рентгеновской дифракции (XRD), инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS), сканирующей электронной микроскопии (ESEM) и просвечивающей электронной микроскопии (TEM), протонно-индуцированного рентгеновского эмиссионного анализа (PIXE), атомно-силовой микроскопии (AFM) (Okpara EC et al., 2020) (табл. 1).

Таблица 1. Объекты «зелёного» синтеза и методы оценки морфометрических показателей наночастиц

Table 1. Objects of «green» synthesis and methods for assessing the morphometric parameters of nanoparticles

Сырьё для синтеза НЧ / <i>Raw materials for the synthesis of NPs</i>	Методы идентификации НЧ / <i>NP identification methods</i>	Морфометрические характеристики / <i>Morphometric characteristics</i>
1	2	3
Зелёный чай ( <i>Camellia sinensis</i> ) синтез наночастиц FeO / <i>green tea (Camellia sinensis) synthesis of FeO nanoparticles</i>	UV-vis, FTIR, ESEM, EDS, XRD, спектроскопия дзета-потенциала / <i>UV-vis, FTIR, ESEM, EDS, XRD, zeta potential spectroscopy</i>	Размер 114 нм, гексагональная и сферическая / <i>Size 114 nm hexagonal and spherical</i>
Синтез: одностадийный метод восстановления с использованием лимонной кислоты (Fe); простой метод осаждения с использованием сульфата цинка и гидроксида натрия в качестве исходных материалов (Zn). / <i>Synthesis: one-step reduction method using citric acid (Fe); simple precipitation method using zinc sulfate and sodium hydroxide as starting materials (Zn).</i>	XRD, ESEM, EDS, PIXE / <i>XRD, ESEM, EDS, PIXE</i>	11 нм FeNP 15 нм CuNP 70 нм SeNP 105 нм ZnNP / <i>11 nm FeNP 15 nm CuNP 70 nm SeNP 105 nm ZnNP</i>

Продолжение таблицы 1		
1	2	3
Аспера усыпанная ( <i>L. aspera</i> ) Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> / Aspera strewn ( <i>L. aspera</i> ) Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub>	UV-vis, РФА, спектроскопия дзета-потенциала, ESEM / UV-vis, XRF, zeta potential spectroscopy, ESEM	НЧ ZnO: 29,5-35,10 нм, сферическая форма с несколькими стержнями / ZnO NPs: 29.5-35.10 nm, spherical shape with multiple rods
Андрографис метельчатый ( <i>Andrographis paniculata</i> ), синтез наночастиц TiO <sub>2</sub> / Panicled <i>Andrographis</i> ( <i>Andrographis paniculata</i> ), synthesis of TiO <sub>2</sub> nanoparticles	UV-vis, XRD, ESEM, TEM, AFM / UV-vis, XRD, ESEM, TEM, AFM	размер 50 нм, сферическая форма / size 50 nm, spherical shape
Экстракт листьев папайя ( <i>Carica papaya</i> ), тетрагидрат хлорида марганца (MnCl <sub>2</sub> × 4H <sub>2</sub> O), тетрагидрат хлорида цинка (ZnCl <sub>2</sub> × 4H <sub>2</sub> O) / <i>Papaya Leaf Extract</i> ( <i>Carica papaya</i> ,) manganese chloride tetrahydrate (MnCl <sub>2</sub> × 4H <sub>2</sub> O), zinc chloride tetrahydrate (ZnCl <sub>2</sub> × 4H <sub>2</sub> O)	FTIR, XRD, ESEM / FTIR, XRD, ESEM	размер НЧ Mn-Zn составляет 103 нм / NP size Mn-Zn up to 103 nm
Экстракт кожуры ананаса ( <i>Ananas comosus</i> L.), наночастицы Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> / <i>Ananas</i> ( <i>Ananas comosus</i> L.) peel extract, Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanoparticles	ESEM, спектроскопия дзета-потенциала / ESEM, zeta potential spectroscopy	размер 40-50 нм, сферическая форма / size 40-50 nm spherical shape
Экстракт чеснока ( <i>Allium sativum</i> ), наночастицы хрома (CrNPs) / <i>Garlic extract</i> ( <i>Allium sativum</i> ), chromium nanoparticles (CrNPs)	UV-vis, ESEM, EDX, XRD и FTIR / UV-vis, ESEM, EDX, XRD FTIR	CrNP размер 31-64 нм, монодисперсные и высокостабильные / CrNP size 31-64 nm monodisperse and highly stable
Экстракт чеснока ( <i>Allium sativum</i> ), наночастицы селена GBGS-SeNP / <i>Garlic extract</i> ( <i>Allium sativum</i> ), selenium nanoparticles GBGS-SeNP	UV-vis, ESEM, EDX, XRD и FTIR / UV-vis, ESEM, EDX, XRD and FTIR	GBGS-SeNP, размер 48-87 нм / GBGS-SeNP, size 48-87 nm
Экстракт листьев мангустина ( <i>G. mangostana</i> L.), тригидрат нитрата меди (II) [Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> × 3H <sub>2</sub> O] / <i>Mangosteen leaf extract</i> ( <i>G. mangostana</i> L.), Copper(II) nitrate trihydrate [Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> × 3H <sub>2</sub> O]	UV-vis, РФА, FTIR ESEM и TEM / UV-vis, XRF, FTIR ESEM and TEM	Чем выше температура прокаливания, тем больше размер частиц от 50,0 нм до 458,3 нм / The higher the calcinations temperature, the larger the particle size from 50.0 nm to 458.3 nm

Говоря о перспективности использования направленного «зелёного» синтеза наночастиц, следует отметить, что широкий спектр представленных метааналитических литературных данных свидетельствует о высоком уровне потенциала использования биологических наночастиц, полученных на основе экстрактов растений. Выбор потенциального продуцента (восстановителя) НЧ из водных растворов относительно безграничен, так как представленные научные данные свидетельствуют о том, что источником фитохимических соединений могут выступать как относительно редко встречающиеся лекарственные растения, так и некоторые садовые культуры. Что в свою очередь создаёт широкое поле для проведения научных исследований, направленных на использование «зелёного» синтеза наночастиц для создания кормовых добавок и лекарственных препаратов

с выраженными антибактериальным и противогрибковым действиями для применения в области медицины (Umar H et al., 2018; Alhujaily M et al., 2022; Mandal AK et al., 2022) и ветеринарии (Al-dalbahi A et al., 2020; Alyamani AA et al., 2021; Gur T et al., 2022).

**Перспективность использования наночастиц, полученных направленным «зелёным» синтезом, на различных представителях аквакультуры.**

Многочисленные исследования свидетельствуют о высоком потенциале и перспективности использования наночастиц металлов для устойчивого развития аквакультуры. Способы получения НЧ и внесение их в состав кормовых смесей также являются немаловажным этапом в создании новых кормовых добавок (табл. 2). Широкий спектр применяемых авторами эмпирических методов, оценки эффективности применяемых «зелёных» наночастиц, таких как морфометрические характеристики исследуемых гидробионтов (увеличение живой массы тела и динамические показатели роста), гематологические и биохимические показатели крови, ферментативная (супероксиддисмутазы, каталазы и др.), иммунологическая (лизоцимная, фагоцитарная активности, фагоцитарный индекс, активность респираторного взрыва, экспрессия генов, связанных с иммунитетом (IL-1 $\beta$ , TGF, TNF)), и антиоксидантная активность, гистологическое исследование органов мишеней (кишечник, жабры, печень) и ряд других методических подходов, обеспечивающих системный анализ данных.

Таблица 2. Анализ литературных эмпирических данных по использованию наночастиц металлов из группы эссенциальных элементов в кормлении различных представителей аквакультуры

Table 2. Literature analysis of empirical data on the use of metal nanoparticles from the group of essential elements in the feeding of various representatives of aquaculture

Используемые наночастицы / <i>Used nanoparticles</i>	Дозы НЧ / <i>Doses of NP</i>	Представители аквакультуры / <i>Aquaculture representatives</i>	Результаты применения / <i>Application results</i>
1	2	3	4
ZnONP, полученные методом «зелёного» синтеза / <i>ZnONPs produced by «green» synthesis</i> (Thangapandiyar S and Monika S., 2020)	5, 7,5 и 10 мг/кг корма / <i>5, 7.5 and 10 mg/kg feed</i>	Рыба роху ( <i>Labeo rohita</i> ) / <i>Rohu fish (Labeo rohita)</i>	Существенное увеличение роста и метаболических процессов при добавлении 5 мг/кг ZnONP к основному рациону / <i>Significant increase in growth and metabolic processes with the addition of 5 mg/kg ZnONP to the basic diet</i>
ZnO-NP, «зелёный» синтез на основе экстракта <i>Ulva fasciata</i> / <i>ZnO-NP «green» synthesis based on Ulva fasciata extract</i> (Diab AM et al., 2022)	40, 60 мг/кг корма / <i>40, 60 mg/kg feed</i>	Нильская тилapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) / <i>Nile Tilapia (Oreochromis niloticus)</i>	Улучшение показателей роста, ферментативной и иммунологической активности, выживаемости при инфицировании <i>Candida albicans</i> . Рекомендуемая доза – 40 мг/кг корма / <i>Improvement in growth rates, enzymatic and immunological activity, survival rate when infected with Candida albicans. The recommended dose is 40 mg/kg feed</i>

Продолжение таблицы 2			
1	2	3	4
Наночастицы селена (Se-NP) и оксида цинка (ZnO-NP) / <i>Selenium (Se-NP) and zinc oxide (ZnO-NP) nanoparticles</i> (Ghazi S et al., 2022)	смесь 1 мг/кг Se-NP и 10 мг/кг ZnO-NP рациона / <i>mixture of 1 mg/kg Se-NP and 10 mg/kg ZnO-NP diet</i>	Нильская тилapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) / Nile Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Повышение уровня гемоглобина, эритроцитов, глобулина, активности супероксиддисмутазы и каталазы при одновременном снижении активности мальнового альбумина по отношению к контролю. Значительное увеличение длины ворсинок и количества бокаловидных клеток / <i>An increase in the level of hemoglobin, erythrocytes, globulin, activity of superoxide dismutase and catalase, while reducing the activity of malonic aldehyde in relation to the control. A significant increase in villus length and the number of goblet cells</i>
ZnO-NP. «зелёный» синтез на основе экстракта <i>L. aspera</i> / <i>ZnO-NP «green» synthesis based on L. aspera extract</i> (Kurian A and Elumalai P, 2021)	100, 200, 400 мг/кг корма / <i>100, 200, 400 mg/kg feed</i>	Нильская тилapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) / Nile Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Зелёные синтезированные наночастицы ZnO проявляют повышенную активность против <i>A. hydrophila</i> и <i>S. agalactiae</i> . Применение НЧ в максимальной дозе (400 мг/кг) в рационе могут улучшать активность антиоксидантных ферментов, снижать окислительный стресс и улучшать иммунный статус, не вызывая каких-либо гистологических изменений в органах рыб / <i>The green synthesized ZnO nanoparticles show enhanced activity against A. hydrophila and S. agalactiae. The use of NPs at the maximum dose (400 mg/kg) in the diet can improve the activity of antioxidant enzymes, reduce oxidative stress and improve the immune status without causing any histological changes in fish organs</i>
Zn-протеинат / <i>Zn-proteinate</i> (Yang J et al., 2022)	30, 60, 90 и 120 мг/кг добавляли в контрольный рацион. Ингредиенты тщательно перемешивали и гранулировали с приблизительным диаметром 2 мм / <i>30, 60, 90 and 120 mg/kg were added to the control diet. The ingredients were thoroughly mixed and granulated with an approximate diameter of 2 mm</i>	Белые креветки ( <i>Litopenaeus vannamei</i> Boone, 1931) / <i>White shrimp (Litopenaeus vannamei Boone, 1931)</i>	Повышает содержание цинка и экспрессию генов ZnT1, ZIP11 и MT в гепатопанкреасе, а также повышает антиоксидантную способность и иммунитет (с точки зрения повышения активности T-SOD, Cu/Zn-SOD, PO, LZM, снижения содержания MDA, повышенная экспрессия GST, G6PDH, ProPO, LZM и Hemo и повышенная устойчивость к <i>V. parahaemolyticus</i> ). Улучшил сообщества кишечной микробиоты, увеличил количество потенциально полезных бактерий и уменьшил количество потенциально патогенных / <i>Increases zinc content and expression of ZnT1, ZIP11 and MT genes in the hepatopancreas, and also increases antioxidant capacity and immunity (in terms of increased activity of T-SOD, Cu/Zn-SOD, PO, LZM, decreased MDA content, increased expression of GST, G6PDH, ProPO, LZM and Hemo and increased resistance to V. parahaemolyticus). Improved gut microbiota communities, increased potentially beneficial bacteria and reduced potential pathogens</i>



Продолжение таблицы 2			
1	2	3	4
Зелёные синтезированные НЧ $Mn_3O_4$ с использованием экстракта кожуры <i>Ananas comosus</i> (L.) / <i>Green synthesized <math>Mn_3O_4</math> NPs using Ananas comosus (L.) peel extract</i> (Asaikkutti A et al., 2016)	3,0, 6,0, 9,0, 12, 15 и 18 мг/кг корма / 3.0, 6.0, 9.0, 12, 15 and 18 mg/kg feed	Пресноводные креветки ( <i>Macrobrachium rosenbergii</i> ) / <i>Freshwater shrimp (Macrobrachium rosenbergii)</i>	Увеличение показателей роста, включая конечную массу и привес. Значительные различия в коэффициенте конверсии корма. NPs оксида Mn улучшили показатели пищеварительных ферментов и биохимического состава мышц. Предложено добавить 15 мг/кг НЧ оксида марганца для гибкого повышения выживаемости, роста и производства <i>M. rosenbergii</i> / <i>Increased growth rates, including final weight and weight gain. Significant differences in feed conversion rate. Mn oxide NPs improved digestive enzymes and muscle chemistry. It has been proposed to add 15mg/kg manganese oxide NPs to flexibly increase the survival, growth and production of M. rosenbergii</i>
Зелёные синтезированные НЧ CrNPs с использованием экстракта <i>Allium sativum</i> / <i>Green synthesized NPs CrNPs using Allium sativum extract</i> (Satgurunathan T et al., 2019)	4,94 мг/л науплий артемии с различной продолжительностью (0,5, 1, 2 и 4 ч) перед скармливанием / 4.94 mg/l brine shrimp naupli with various durations (0.5, 1, 2 and 4 h) before feeding	Пресноводные креветки ( <i>Macrobrachium rosenbergii</i> ) / <i>Freshwater shrimp (Macrobrachium rosenbergii)</i>	Получасовое и часовое обогащение науплий артемии привело к значительному улучшению показателей питания, включая рост и выживаемость, а также концентрации биохимических компонентов тканей, таких как общий белок, аминокислоты, углеводы и липиды <i>M. rosenbergii</i> / <i>Half-hour and hourly enrichment of brine shrimp nauplii resulted in significant improvements in nutritional outcomes, including growth and survival, and concentrations of tissue biochemical components such as total protein, amino acids, carbohydrates, and lipids of M. rosenbergii</i>

Представленные в таблице 2 данные свидетельствуют о высоком уровне биологической активности ультрадисперсных металлических частиц, синтезированных на основе фитохимических веществ, содержащихся в водных экстрактах растений. Доказательная база эмпирических данных (Yang J et al., 2022; Diab AM et al., 2022; Satgurunathan T et al., 2019) потенцированного эффекта НЧ, полученных направленным зелёным синтезом на моделях гидробионтов, свидетельствует о выраженном стимулирующем действии НЧ на показатели антиоксидантной, ферментативной и иммунологической активности, что в свою очередь обеспечивает более высокие показатели устойчивости к воздействию стресс-факторов и патогенным микроорганизмам. Также следует отметить, что рядом исследователей выдвинута гипотеза о взаимосвязи между увеличением длины ворсинок и бокаловидных клеток с увеличением динамических характеристик роста и снижением коэффициента конверсии корма на фоне применения комбинации наночастиц селена и цинка (Ghazi S et al., 2022).

Наряду с вышеизложенным, хотелось бы отметить, что относительная простота реализации процесса «зелёного» синтеза делает его весьма привлекательным для создания новых кормовых добавок, обеспечивающих повышение физиологических и реакционных показателей гидробионтов (Ibrahim MS et al., 2022; Ghaniem S et al., 2022; Younus N and Zuberi A., 2022).

#### **Заключение.**

Обзор метааналитических эмпирических литературных данных по направленному синтезу «зелёных» наночастиц на основе экстрактов растений свидетельствует о высоком потенциале данного направления исследований, обусловленных, прежде всего, высокой биологической активностью получаемых НЧ, простотой и экологической безопасностью синтеза. При этом следует отметить, что в качестве объектов синтеза может выступить любое растение, фитохимические вещества которого обладают высоким восстановительным потенциалом, а в качестве источника НЧ могут быть использованы любые химические (органические и неорганические) соединения металлов, обладающие высоким уровнем диссоциации в водных растворах. Основная трудность синтеза обусловлена адаптацией методики синтеза с учётом таких факторов, как температура, pH среды и время взаимодействия, а также трудоёмкостью методов по оценке морфометрических характеристик синтезируемых наночастиц.

Однако, не смотря на вышеизложенные трудности, целесообразность исследований, направленных на использование «зелёных» наночастиц в условиях интенсивно развивающейся промышленной аквакультуры, весьма высока, так как данные вещества могут не только выступить в качестве альтернативы кормовым антибиотикам, но и существенно повысить уровень динамических характеристик роста на фоне снижения коэффициента корма.

#### **Список источников**

#### **References**

1. Akter S, Jahan N, Rohani MF, Akter Y, Shahjahan M. Chromium supplementation in diet enhances growth and feed utilization of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). Biol Trace Elem Res. 2021;199(12):4811-4819. doi: 10.1007/s12011-021-02608-2
2. Alam MW, Al Qahtani HS, Aamir M, Abuzir A, Khan MS, Albuhalayqah M, Mushtaq S, Zaidi N, Ramya A. Phyto synthesis of manganese-doped zinc nanoparticles using *Carica papaya* leaves: structural properties and its evaluation for catalytic, antibacterial and antioxidant activities. Polymers (Basel). 2022;14(9):1827. doi: 10.3390/polym14091827
3. Aldalbahi A, Alterary S, Ali Abdullrahman Almoghim R, Awad MA, Aldosari NS, Fahad Alghannam S, Nasser Alabdan A, Alharbi S, Ali Mohammed Alateeq B, Abdulrahman Al Mohsen A, Alkathiri MA, Abdulrahman Alrashed R. Greener synthesis of zinc oxide nanoparticles: characterization and multifaceted applications. Molecules. 2020;25(18):4198. doi: 10.3390/molecules25184198
4. Alhujaily M, Albukhaty S, Yusuf M, Mohammed MKA, Sulaiman GM, Al-Karagoly H, Al-yamani AA, Albaqami J, AlMalki FA. Recent advances in plant-mediated zinc oxide nanoparticles with their significant biomedical properties. Bioengineering (Basel). 2022;9(10):541. doi: 10.3390/bioengineering9100541
5. Al Jabri H, Saleem MH, Rizwan M, Hussain I, Usman K, Alsafran M. Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: overview. Life (Basel). 2022;12(4):594. doi: 10.3390/life12040594
6. Alyamani AA, Albukhaty S, Aloufi S, AlMalki FA, Al-Karagoly H, Sulaiman GM. Green fabrication of zinc oxide nanoparticles using *phlomis* leaf extract: characterization and in vitro evaluation of cytotoxicity and antibacterial properties. Molecules. 2021;26(20):6140. doi: 10.3390/molecules26206140
7. Aminuzzaman M, Ying LP, Goh WS, Watanabe A. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Garcinia mangostana* fruit pericarp and their photocatalytic activity. Bull Mater. Sci. 2018;41:50. doi: 10.1007/s12034-018-1568-4

8. Asaikkutti A, Bhavan PS, Vimala K, Karthik M, Cheruparambath P. Dietary supplementation of green synthesized manganese-oxide nanoparticles and its effect on growth performance, muscle composition and digestive enzyme activities of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *J Trace Elem Med Biol.* 2016;35:7-17. doi: 10.1016/j.jtemb.2016.01.005
9. Ashouri S, Keyvanshokoo S, Salati AP, Johari SA, Pasha-Zanoosi H. Effects of different levels of dietary selenium nanoparticles on growth performance, muscle composition, blood biochemical profiles and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture.* 2015;446:25-29. doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.04.021
10. Behera T, Swain P, Rangacharulu PV, et al. Nano-Fe as feed additive improves the hematological and immunological parameters of fish, *Labeo rohita* H. *Appl Nanosci.* 2014;4:687-694. doi: 10.1007/s13204-013-0251-8
11. Chan YB, Selvanathan V, Tey LH, Akhtaruzzaman M, Anur FH, Djearamane S, Watanabe A, Aminuzzaman M. Effect of calcination temperature on structural, morphological and optical properties of copper oxide nanostructures derived from *Garcinia mangostana* L. leaf extract. *Nanomaterials (Basel).* 2022;12(20):3589. doi: 10.3390/nano12203589
12. Chen J, Sun R, Pan C, Sun Y, Mai B, Li QX. Antibiotics and food safety in aquaculture. *J Agric Food Chem.* 2020;68(43):11908-11919. doi: 10.1021/acs.jafc.0c03996
13. Dawood MAO, Alagawany M, Sewilam H. The role of zinc microelement in aquaculture: a review. *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(8):3841-3853. doi: 10.1007/s12011-021-02958-x
14. Dawood MAO. Dietary copper requirements for aquatic animals: a review. *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(12):5273-5282. doi: 10.1007/s12011-021-03079-1
15. Diab AM, Shokr BT, Shukry M, Farrag FA, Mohamed RA. Effects of dietary supplementation with green-synthesized zinc oxide nanoparticles for candidiasis control in *Oreochromis niloticus*. *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(9):4126-4141. doi: 10.1007/s12011-021-02985-8
16. Fuku X, Diallo A, Maaza M. Nanoscaled electrocatalytic optically modulated ZnO nanoparticles through green process of *Punica granatum* L. and their antibacterial activities. *International Journal of Electrochemistry.* 2016;2016:4682967. doi: <https://doi.org/10.1155/2016/4682967>
17. Ghaniem S, Nassef E, Zaineldin AI, Bakr A, Hegazi S. A Comparison of the beneficial effects of inorganic, organic, and elemental nano-selenium on Nile tilapia: growth, immunity, oxidative status, gut morphology, and immune gene expression. *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(12):5226-5241. doi: 10.1007/s12011-021-03075-5
18. Ghazi S, Diab AM, Khalafalla MM, Mohamed RA. Synergistic effects of selenium and zinc oxide nanoparticles on growth performance, hemato-biochemical profile, immune and oxidative stress responses, and intestinal morphometry of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(1):364-374. doi: 10.1007/s12011-021-02631-3
19. Gur T, Meydan I, Seckin H, Bekmezci M, Sen F. Green synthesis, characterization and bioactivity of biogenic zinc oxide nanoparticles. *Environ Res.* 2022;204(Pt A):111897. doi: 10.1016/j.envres.2021.111897
20. Hossain A, Habibullah-Al-Mamun M, Nagano I, Masunaga S, Kitazawa D, Matsuda H. Antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and resistance genes in aquaculture: risks, current concern, and future thinking. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2022;29(8):11054-11075. doi: 10.1007/s11356-021-17825-4
21. Ibrahim MS, El-Gendi GMI, Ahmed AI, El-Haroun ER, Hassaan MS. Nano zinc versus bulk zinc form as dietary supplied: effects on growth, intestinal enzymes and topography, and hemato-biochemical and oxidative stress biomarker in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758). *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(3):1347-1360. doi: 10.1007/s12011-021-02724-z
22. Iwu CD, Korsten L, Okoh AI. The incidence of antibiotic resistance within and beyond the agricultural ecosystem: A concern for public health. *Microbiology Open.* 2020;9(9):e1035. doi: 10.1002/mbo3.1035

23. Jayachandran A, Ashwini TR, Nair AS. Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Cayratia pedata* leaf extract. *Biochem Biophys Rep.* 2021;26:100995. doi: 10.1016/j.bbrep.2021.100995
24. Jayappa MD, Ramaiah CK, Kumar MAP, Suresh D, Prabhu A, Devasya RP, Sheikh S. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from the leaf, stem and in vitro grown callus of *Mussaenda frondosa* L.: characterization and their applications. *Appl Nanosci.* 2020;10(8):3057-3074. doi: 10.1007/s13204-020-01382-2
25. Khan MZH, Hossain MMM, Khan M, Ali MS, Aktar S, Moniruzzaman M, Khan M. Influence of nanoparticle-based nano-nutrients on the growth performance and physiological parameters in tilapia (*Oreochromis niloticus*). *RSC Adv.* 2020;10(50):29918-29922. doi: 10.1039/d0ra06026g
26. Kumar N, Krishnani KK, Kumar P, Singh NP. Zinc nanoparticles potentiates thermal tolerance and cellular stress protection of *Pangasius hypophthalmus* reared under multiple stressors. *J Therm Biol.* 2017;70(Pt B):61-68. doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.10.003
27. Kumar N, Krishnani KK, Gupta SK, Sharma R, Baitha R, Singh DK, Singh NP. Immunoprotective role of biologically synthesized dietary selenium nanoparticles against multiple stressors in *Pangasinodon hypophthalmus*. *Fish Shellfish Immunol.* 2018;78:289-298. doi: 10.1016/j.fsi.2018.04.051
28. Kumar N, Singh NP. Effect of dietary selenium on immuno-biochemical plasticity and resistance against *Aeromonas veronii* biovar *sobria* in fish reared under multiple stressors. *Fish Shellfish Immunol.* 2019;84:38-47. doi: 10.1016/j.fsi.2018.09.065
29. Kumar N, Singh DK, Bhushan S, Jamwal A. Mitigating multiple stresses in *Pangasianodon hypophthalmus* with a novel dietary mixture of selenium nanoparticles and Omega-3-fatty acid. *Sci Rep.* 2021;11(1):19429. doi: 10.1038/s41598-021-98582-9
30. Kurian A, Elumalai P. Study on the impacts of chemical and green synthesized (*Leucas aspera* and oxy-cyclodextrin complex) dietary zinc oxide nanoparticles in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environ Sci Pollut Res Int.* 2021;28(16):20344-20361. doi: 10.1007/s11356-020-11992-6
31. Liu Y, Wu Y, Wu J, Li X, Yu L, Xie K, Zhang M, Ren L, Ji Y, Li Y. Exposure to veterinary antibiotics via food chain disrupts gut microbiota and drives increased *Escherichia coli* virulence and drug resistance in young adults. *Pathogens.* 2022;11(9):1062. doi: 10.3390/pathogens11091062
32. Lyimo GV, Ajayi RF, Maboza E, Adam RZ. A green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Musa Paradisiaca* and *Rooibos* extracts. *MethodsX.* 2022;9:101892. doi: 10.1016/j.mex.2022.101892
33. Mandal AK, Katuwal S, Tettey F, Gupta A, Bhattarai S, Jaisi S, Bhandari DP, Shah AK, Bhattarai N, Parajuli N. Current research on zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, and biomedical applications. *Nanomaterials (Basel).* 2022;12(17):3066. doi: 10.3390/nano12173066
34. Mohammadi C, Mahmud S, Abdullah SM, Mirzaei Y. Green synthesis of ZnO nanoparticles using the aqueous extract of *Euphorbia petiolata* and study of its stability and antibacterial properties. *Moroc J Chem.* 2017;5(3):476-484. doi: 10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v5i3.8974
35. Muralisankar T, Saravana Bhavan P, Radhakrishnan S, Seenivasan C, Srinivasan V. The effect of copper nanoparticles supplementation on freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* post larvae. *J Trace Elem Med Biol.* 2016;34:39-49. doi: 10.1016/j.jtemb.2015.12.003
36. Naderi M, Keyvanshokoo S, Salati AP, Ghaedi A. Combined or individual effects of dietary vitamin E and selenium nanoparticles on humoral immune status and serum parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under high stocking density. *Aquaculture.* 2017;474:40-47. doi: 10.1016/j.aquaculture.2017.03.036
37. Okeke ES, Chukwudozie KI, Nyaruaba R, Ita RE, Oladipo A, Ejeromedoghene O, Atakpa EO, Agu CV, Okoye CO. Antibiotic resistance in aquaculture and aquatic organisms: a review of current nanotechnology applications for sustainable management. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2022;29(46):69241-69274. doi: 10.1007/s11356-022-22319-y
38. Okpara EC, Fayemi OE, Sherif EM, Junaedi H, Ebenso EE. Green wastes mediated zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization and electrochemical studies. *Materials (Basel).* 2020;13(19):4241. doi: 10.3390/ma13194241

39. Osuntokun J, Onwudiwe DC, Ebenso EE. Green synthesis of ZnO nanoparticles using aqueous *Brassica oleracea* L. var. italica and the photocatalytic activity. *Green Chem Lett Rev.* 2019;12:4, 444-457. doi: 10.1080/17518253.2019.1687761
40. Paulpandian P, Beevi IS, Somanath B, Kamatchi RK, Paulraj B, Faggio C. Impact of *Camellia sinensis* iron oxide nanoparticle on growth, hemato-biochemical and antioxidant capacity of blue gourami (*Trichogaster trichopterus*) fingerlings. *Biol Trace Elem Res.* 2023; 201(1):412-424. doi: 10.1007/s12011-022-03145-2
41. Rajeshkumar S, Santhoshkumar J, Jule LT, Ramaswamy K. Phytosynthesis of titanium dioxide nanoparticles using king of bitter *Andrographis paniculata* and its embryonic toxicology evaluation and biomedical potential. *Bioinorg Chem Appl.* 2021;2021:6267634. doi: 10.1155/2021/6267634
42. Rathore SS, Murthy HS, Mamun MA, Nasren S, Rakesh K, Kumar BTN, Abhiman PB, Khandagale AS. Nano-selenium supplementation to ameliorate nutrition physiology, immune response, antioxidant system and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* in monosex Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Biol Trace Elem Res.* 2021;199(8):3073-3088. doi: 10.1007/s12011-020-02416-0
43. Rohani MF, Bristy AA, Hasan J, Hossain MK, Shahjahan M. Dietary zinc in association with vitamin e promotes growth performance of Nile tilapia. *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(9):4150-4159. doi: 10.1007/s12011-021-03001-9
44. Satgurunathan T, Bhavan PS, Joy RDS. Green synthesis of chromium nanoparticles and their effects on the growth of the prawn *Macrobrachium rosenbergii* post-larvae. *Biol Trace Elem Res.* 2019;187(2):543-552. doi: 10.1007/s12011-018-1407-x
45. Satgurunathan T, Bhavan PS, Kalpana R, Jayakumar T, Sheu JR, Manjunath M. Influence of garlic (*Allium sativum*) clove-based selenium nanoparticles on status of nutritional, biochemical, enzymological, and gene expressions in the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879). *Biol Trace Elem Res.* 2022. doi: 10.1007/s12011-022-03300-9
46. Shahpar Z, Johari SA. Effects of dietary organic, inorganic, and nanoparticulate zinc on rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* larvae. *Biol Trace Elem Res.* 2019;190(2):535-540. doi: 10.1007/s12011-018-1563-z
47. Srinivasan V, Bhavan PS, Rajkumar G, Satgurunathan T, Muralisankar T. Dietary supplementation of magnesium oxide (MgO) nanoparticles for better survival and growth of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* post-larvae. *Biol Trace Elem Res.* 2017;177(1):196-208. doi: 10.1007/s12011-016-0855-4
48. Thangapandiyam S, Monika S. Green synthesized zinc oxide nanoparticles as feed additives to improve growth, biochemical, and hematological parameters in freshwater fish *Labeo rohita*. *Biol Trace Elem Res.* 2020;195(2):636-647. doi: 10.1007/s12011-019-01873-6
49. Umar H, Kavaz D, Rizaner N. Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using *Albizia lebbek* stem bark, and evaluation of its antimicrobial, antioxidant, and cytotoxic activities on human breast cancer cell lines. *Int J Nanomedicine.* 2018; 14:87-100. doi: 10.2147/IJN.S186888
50. Yang J, Wang T, Lin G, Li M, Zhang Y, Mai K. The assessment of dietary organic zinc on zinc homeostasis, antioxidant capacity, immune response, glycolysis and intestinal microbiota in white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931). *Antioxidants (Basel).* 2022;11(8):1492. doi: 10.3390/antiox11081492
51. Yanez-Lemus F, Moraga R, Smith CT, Aguayo P, Sánchez-Alonzo K, García-Cancino A, Valenzuela A, Campos VL. Selenium nanoparticle-enriched and potential probiotic, *Lactiplantibacillus plantarum* S14 strain, a diet supplement beneficial for rainbow trout. *Biology (Basel).* 2022;11(10):1523. doi: 10.3390/biology11101523
52. Younus N, Zuberi A, Rashidpour A, Metón I. Dietary cobalt supplementation improves growth and body composition and induces the expression of growth and stress response genes in *Tor putitora*. *Fish Physiol Biochem.* 2020;46(1):371-381. doi: 10.1007/s10695-019-00723-5
53. Younus N, Zuberi A. Significance of extrinsic factors for the optimization of dietary cobalt supplementation in *Tor putitora* fingerlings. *Fish Physiol Biochem.* 2022;48(4):883-897. doi: 10.1007/s10695-022-01089-x

**Информация об авторах:**

**Елена Петровна Мирошникова**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-987-862-98-86.

**Алексей Николаевич Сизенцов**, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биохимии и микробиологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-905-880-36-04.

**Азамат Ерсанович Аринжанов**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-922-806-33-43

**Юлия Владимировна Килякова**, кандидат биологических наук, доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, тел.: 8-961-920-40-64

**Information about the authors:**

**Elena P Mirosnikova**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, tel.: 8-987-862-98-86.

**Aleksey N Sizentsov**, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biochemistry and Microbiology, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-905-880-36-04.

**Azamat E Arinzhanov**, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-922-806-33-43.

**Yulia V Kilyakova**, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-961-920-40-64.

Статья поступила в редакцию 04.12.2022; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 04.12.2022; approved after reviewing 09.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.