

**УДК: 637.56.054:547.441:639.3.043.2**  
**DOI: 10.52419/issn2072-2419.2025.3.411**

**СОДЕРЖАНИЯ МАЛОНОВОГО ДИАЛЬДЕГИДА  
В ТКАНЯХ ЗОЛОТИСТОЙ ФОРЕЛИ (*ONCORCHYNCHUS  
MYKISS*) ПРИ ОБОГАЩЕНИИ КОРМОВ  
ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫМИ ХЕЛАТНЫМИ  
КОМПЛЕКСАМИ**

**Полистовская П.А.** – канд. бiol. наук., доц. каф. биохимии и физиологии (ORCID 0000-0003-1977-0913); **Карпенко Л.Ю.** – д-р бiol. наук, проф., зав. каф. биохимии и физиологии (ORCID 0000-0002-2781-5993); **Махнин И.А.** – аспирант 2-го года обучения, асс. каф. биохимии и физиологии (ORCID 0000-0002-7484-3591)

ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины”

ilya.makh@mail.ru

**Ключевые слова:** хелатные комплексы, форель, малоновый альдегид, каталаза, антиоксидантная система

**Keywords:** chelate complexes,trout,malonic aldehyde,catalase,antioxidant system

**Благодарность:** Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда 23-76-01042, <https://rscf.ru/project/23-76-01042/>

**Поступила: 02.06.2025**

**Принята к публикации: 26.08.2025**

**Опубликована онлайн: 15.09.2025**



**РЕФЕРАТ**

Активность антиоксидантных ферментов зависит от ряда переменных в т.ч. содержания нутриентов в рационе. Для нормализации минеральной компоненты рационов предлагается применять различные металло содержащие препараты в т.ч хелатные (внутрикомплексные) соединения. Рядом исследований продемонстрировано, что хелатные соединения обладают большей биодоступностью в сравнении с неорганическими источниками микроэлементов. Целью исследования явилось изучение влияния хелатного комплекса на процессы свободнорадикального окисления в организме форели, путем определения активности каталазы и содержания малонового альдегида. Исследовали органоминеральный хелатный комплекс (ООО “Юпитер”, Россия). Действующая основа минеральной добавки: комплекс этилендиаминдиантарной кислоты и лизина с микроэлементами (Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Se, I). Рыбам опытных групп (n=10) в течение 30-ти дней задавали добавку, данные сравнивали с контролем (n=10). Хелатный комплекс задавали вместе с кормом один раз в день, в концентрации 0,5 г/кг (считая от массы корма). Определяли активность каталазы и концентрацию малонового альдегида в печени и мышцах. Применение органоминеральных хелатных комплексов приводило к снижению содержания малонового диальдегида в печени и скелетных мышцах. Снижение продуктов перекисного окисления липидов сопровождалось значимым увеличением активности каталазы. Проведенные исследования позволяют предположить, что металлы в составе хелатных комплексов приводят к уве-

личению активности антиоксидантных ферментов, в результате чего происходит снижение продуктов перекисного окисления липидов. Таким образом полученные результаты служат косвенным подтверждением эффективности применения органоминеральных хелатных комплексов в индустриальной аквакультуре.

## **ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION**

Аквакультура является одним из приоритетных направлений развития животноводства, обеспечивающих продовольственную безопасность страны [1].

Интенсификации индустриальной аквакультуры сопровождается увеличением числа технологических стрессоров, таких как высокая плотность посадки, гипоксия и недоедание [2]. Суммация данных факторов может приводить к увеличению генерации активных форм кислорода и развитию некомпенсированного окислительного (оксидативного) стресса [3]. Показано, что окислительный стресс приводит к повреждению белков и нуклеиновых кислот, деградации фосфолипидов мембран, образованию межмолекулярных комплексов [4]. Противодействует окислительному стрессу система антиоксидантной защиты. Данная система включает в себя антиоксидантные ферменты, такие как супероксиддисмутаза, каталаза, глутатионпероксидаза, глутатион-S-трансфераза, глукозо-6-фосфатдегидрогеназа и глутатионредуктаза, а также антиоксиданты неферментативной природы, такие как восстановленный глутатион, витамин Е, витамин С, мелатонин и flavonoidы [5].

Активность антиоксидантных ферментов зависит от ряда переменных в т.ч. содержания нутриентов в рационе [3,6]. Показано, что недостаток селена, цинка, марганца или меди являются факторами, способствующими развитию окислительного стресса [7]. Для коррекции минеральной компоненты рационов предлагаются применять различные металлокомплексы содержащие препараты в т.ч. хелатные (внутрикомплексные) соединения. Рядом исследований продемонстрировано, что хелатные соединения обладают большей биодоступностью в сравнении с неорганическими источниками микроэлементов [8-10]. Весьма немногочисленны исследования, посвященные изучению эффектов

хелатных комплексов, выполненные на рыбах.

Целью исследования явилось изучение влияния хелатного комплекса на процессы свободнорадикального окисления в организме форели, путем определения активности каталазы и содержания малонового альдегида.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS**

Исследование проводили в соответствии с международным этическим стандартом, изложенным в Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в других научных целях (Страсбург, 18.03.1986).

Работа выполнена на базе кафедры биохимии и физиологии ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины”.

Эксперимент проводили в течение месяца. Объектом исследования служили сеголетки (0+) радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), содержащиеся в рыбном хозяйстве на территории Ленинградской области. Методом пар-аналогов были сформированы опытная (n=10) и контрольная (n=10) группы. Длина тела (от рострума до кончика хвоста) и масса представлены в таблице 1.

Исследовали органоминеральный хелатный комплекс (ООО “Юпитер”, Россия). Действующая основа минеральной добавки: комплекс этилендиаминтирной кислоты и лизина с микроэлементами (Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Se, I). Микроэлементный состав хелатного комплекса представлен в таблице 2.

Рыbam опытных групп (n=10) в течение 30-ти дней задавали добавку, данные сравнивали с контролем (n=10). Хелатный комплекс задавали вместе с кормом один раз в день, в концентрации 0,5 г/кг (считая от массы корма). Рыб эвтаназировали раствором трикаина (MC-222) в концентрации 170 мг/л. Контрольный метод

эвтаназии - обезглавливание.

Проводили терминальный отбор крови из сердца с помощью инъекционных одноразовых шприцов 2 мл с иглой 23G (SFM, Германия). Предварительно шприц промывали раствором гепарина 5000 МЕ/мл (Московский эндокринный завод, Россия). После отбора кровь переносили в пробирки вакуумные с активатором свертывания и гелем 2 мл (АО Елатомский приборный завод, Россия). Сыворотку крови получали путем центрифугирования в течение 15 минут при 3000 об/мин на центрифуге Heraeus Megafuge 40/40R (ThermoFisher Scientific, США).

Получали образцы печени и мышечной ткани (в области спинных мышц). Ткани отмывали физиологическим раствором, после чего замораживали (-18°C). Непосредственно перед исследованием образцы печени и мышц взвешивали, измельчали и гомогенизировали, добавляя

при этом 0,1 М фосфатный буфер (рН 7,4), охлажденный до 0 °C, в соотношении «ткань-буфер» 1:6.

Определение активности каталазы проводили методом перманганатометрии по А.Н. Баху, С.З. Зубкову [11].

Определение концентрации малонового диальдегида проводили колориметрическим колориметрическим методом с тиобарбитуровой кислотой [12].

Статистическая обработка полученных данных проводилась в программе GraphPad Prism 8 (GraphPad Software, Inc.). Сравнения двух независимых групп проводилось с помощью критерия Стьюдента. Данные с нормальным распределением представлены как среднее ± стандартная ошибка среднего –Mean. Различия между группами считали достоверными при  $p < 0,05$ .

**Таблица 1 — Размерно-весовые показатели рыб**

Длина тела, см	16,4±2,4
Масса, г	50,4±5,7

**Таблица 2 — Микроэлементный состав исследуемого органоминерального хелатного комплекса**

Микроэлемент	Содержание г/кг
Железо	33,1
марганец	6,7
медь	3,4
цинк	18,6
кобальт	0,76
селен	0,43
йод	1,01
Общее количество (сумма) элементов	64

### РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Оксидативный стресс в индустриальном рыбоводстве возникает из-за ряда технологических особенностей, например, перепадов уровня кислорода (гипоксия), регулярных сортировок (в т.ч. бонитировка), высокой плотности посадки. Хелатные комплексы могут оказывать влияние на активность антиоксидантной системы, поскольку металлы (в т.ч. входящие в состав комплекса) являются ко-

факторами антиоксидантных ферментов (например, каталазы).

Применение органоминеральных хелатных комплексов приводило к снижению содержания малонового диальдегида в печени и скелетных мышцах (см. рис.1,2). Снижение продуктов перекисного окисления липидов сопровождалось значимым увеличением активности каталазы (см.рис.3). Полученные данные согласуются с рядом аналогичных исследо-

ваний. Например, было показано снижение малонового альдегида у белого амура получавшего корм с добавлением селена [13]. Кроме того, применение дрожжевого селена привело к достоверному увеличению активности каталазы и глутатионпероксидазы [14]. Железо также участвует в модуляции антиоксидантной защиты. Исследования, проведенные на индийских карпах, показали, что применение наночастиц железа приводит к увеличению активности супероксиддисмутазы и каталазы и снижению концентрации малонового альдегида [15]. Цинк предотвращает перекисное окисление липидов и, таким образом, играет важную роль в защите клеток от окислительного стресса. В ранее проведенном исследование, обогащение корма пангасиусов цинком, приводило к снижению окислительного стресса, что объясняется повышением активности Zn-зависимой супероксиддисмутазы [16]. Медь является структурным компонентом металлоэнзимов в т.ч. Си-зависимой супероксиддисмутазы. Применение меди в составе кормов для белого амура приводило к снижению концентрации малонового альдегида, увеличивая при этом активность супероксиддисмутазы, каталазы, глутатионпероксидазы, глутатионредуктазы, глутатион-S-трансферазы и содержания глутатиона в гепатопанкреасе и кишечнике [17]. Марганец эссенсален для функционирования антиоксидантной защиты и активации различных ферментов [18]. Однако в высоких дозах марганец является гепато- и нейротоксичным [19]. Марганец может накапливаться в митохондриях гепатоцитов, нарушать окислительное фосфорилирование и увеличивать количество активных форм кислорода [20].

Проведенные исследования позволяют предположить, что металлы в составе хелатных комплексов приводят к увеличению активности антиоксидантных ферментов, в результате чего происходит снижение продуктов перекисного окисления липидов. Таким образом полученные результаты служат косвенным подтверждением эффективности применения ор-

ганиоминеральных хелатных комплексов в индустриальной аквакультуре.

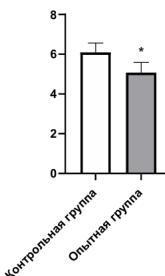


Рисунок 1 — Содержание малонового альдегида в мышцах (нмоль/ г ткань).

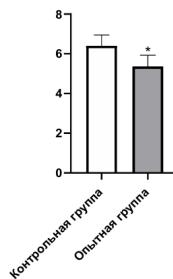


Рисунок 2 — Содержание малонового альдегида в печени (нмоль/ г ткани).

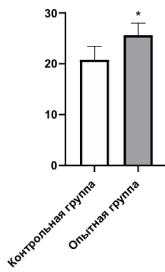


Рисунок 3 — Активность каталазы сыворотки крови (мкмоль/ мг белка за мин.).

## ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Проведено изучение влияния хелатного комплекса на процессы свободнорадикального окисления в организме форели, путем определения активности каталазы и содержания малонового альдегида. Показано, что применение хелатного комплекса приводит к модуляции актив-

ности антиоксидантной системы. Динамика активности каталазы и концентрации малонового альдегида может быть обусловлена тем, что металлы выступают в качестве коферментов металлоэнзимов.

### **CONTENT OF MALONIC DIALDEHYDE IN THE TISSUES OF GOLDEN TROUT (ONCORCHYNCHUS MYKISS) WHEN FEED IS ENRICHED WITH ORGANOMINERAL CHELATE COMPLEXES**

**Polistovskaya P.A.** – PhD., associate Professor of the Department of Biochemistry and Physiology (ORCID 0000-0003-1977-0913); **Karpenko L.Yu.** – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department. Biochemistry and physiology (ORCID 0000-0002-2781-5993); **Makhnin I.A.\*** - post-graduate student of the 2st year of study, assistant of the Department of Biochemistry and Physiology (ORCID 0000-0002-7484-3591)

St. Petersburg State University of Veterinary Medicine

\* ilya.makh@mail.ru

**Financing:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation 23-76-01042, <https://rscf.ru/project/23-76-01042/>

### **ABSTRACT**

The activity of antioxidant enzymes depends on a number of variables, including the content of nutrients in the diet. To normalize the mineral component of diets, it is proposed to use various metal-containing preparations, including chelated (intra-complex) compounds. A number of studies have demonstrated that chelated compounds have greater bioavailability compared to inorganic sources of trace elements. The aim of the study was to study the effect of the chelate complex on the processes of free radical oxidation in trout by determining the activity of catalase and the content of malonic aldehyde. An organomineral chelate complex (Jupiter LLC, Russia) was investigated. The active base of the mineral supplement is a complex of ethylenediaminedian-

tharic acid and lysine with trace elements (Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Se, I). Fish of the experimental groups ( $n=10$ ) were given the supplement for 30 days; the data were compared with the control ( $n=10$ ). The chelate complex was administered together with the feed once a day, at a concentration of 0.5 g/kg (counting from the weight of the feed). The activity of catalase and the concentration of malonic aldehyde in the liver and muscles were determined. The use of organomineral chelate complexes led to a decrease in the content of malondialdehyde in the liver and skeletal muscles. A decrease in lipid peroxidation products was accompanied by a significant increase in catalase activity. The conducted studies suggest that metals in the composition of chelate complexes lead to an increase in the activity of antioxidant enzymes, resulting in a decrease in lipid peroxidation products. Thus, the results obtained serve as an indirect confirmation of the effectiveness of the use of organomineral chelate complexes in industrial aquaculture.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Марченко Ирина Сергеевна Развитие аквакультуры как фактор обеспечения продовольственной безопасности // Евразийский Союз Ученых. 2015. №11-4 (20).
2. Martos-Sitcha, Juan Antonio et al. "Editorial: Welfare and Stressors in Fish: Challenges Facing Aquaculture." Frontiers in physiology vol. 11 162. 25 Feb. 2020, doi:10.3389/fphys.2020.00162
3. Zengin, H. The effects of feeding and starvation on antioxidant defence, fatty acid composition and lipid peroxidation in reared *Oncorhynchus mykiss* fry. Sci Rep 11, 16716 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96204-y>
4. Карбышев, М. С. Биохимия оксидативного стресса: Учебно-методическое пособие / М. С. Карбышев, Ш. П. Абдуллаев; под общ. ред. А. В. Шеспопалова. - Москва: Издательство ХХ, 2018. - 60с.
5. Tunçelli G, Ertik O, Bayrak BB, Memiş D, Yanardag R. Effects of swimming activity and feed restriction on antioxidant and digestive enzymes in juvenile rainbow trout: Im-

- plications for nutritional and exercise strategies in aquaculture. *Vet Med Sci.* 2024 May;10(3):e1466. doi: 10.1002/vms3.1466.
- 6.Лудан В. В., Польская Л. В. Роль антиоксидантов в жизнедеятельности организма // ТМБВ. 2019. №3.).
- 7.Ивахненко, В. И. Исследование активности металло-зависимых ферментов антиоксидантной защиты и показателей перекисного окисления липидов у крыс при действии алиментарных факторов: специальность 03.00.04 «Биохимия»: Автореферат на соискание кандидата биологических наук / Ивахненко, В. И.; ГУ НИИ питания РАМН. — Москва, 2008. — 23 с.
- 8.Ghasemi, H.A., Hajkhodadadi, I., Hafizi, M. et al. Effect of advanced chelate technology-based trace minerals on growth performance, mineral digestibility, tibia characteristics, and antioxidant status in broiler chickens. *Nutr Metab (Lond)* 17, 94 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00520-5>
- 9.Каркищенко Н. Н., Каркищенко В. Н., Люблинский С. Л., Капанадзе Г. Д., Шустов Е. Б., Ревякин А. О., Болотских Л. А., Касинская Н. В., Станкова Н. В. Роль микроэлементов в спортивном питании и безопасность металлохелатов // Биомедицина. 2013. №2.
- 10.Кошаев А.Г., Горковенко Н.Е., Косых А.В., Антипова Д.В. Хелатные соединения и их использование для коррекции микроэлементозов сельскохозяйственных животных (обзор литературы). Ветеринария сегодня. 2024;13(2):136-142.
- 11.Лившиц, В. М. Биохимические анализы в клинике: справочник [Текст] / В. М. Лившиц, В. И. Сидельникова. – М.: Медицинское информационное агентство, 1998. – С. 303 (20).
- 12.Богачева Е. В., Алабовский В. В., Петров С. Ю. Определение концентрации малонового диальдегида в сыворотке крыс, облученных электромагнитным полем метрового диапазона // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2016. №1.
- 13.Yu, H., Zhang, C., Zhang, X., Wang, C., Li, P., Liu, G., et al. (2020). Dietary nano-selenium enhances antioxidant capacity and hypoxia tolerance of grass carp *Ctenopharyngodon idella* fed with high-fat diet. *Aquat. Nutr.* 26, 545–557. doi:10.1111/anu.13016
- 14.Liu, G. X., Jiang, G. Z., Lu, K. L., Li, X. F., Zhou, M., Zhang, D. D., et al. (2017). Effects of dietary selenium on the growth, selenium status, antioxidant activities, muscle composition and meat quality of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*. *Aquat. Nutr.* 23, 777–787. doi:10.1111/anu.12444
- 15.Behera, T., Swain, P., Rangacharulu, P.V. et al. Nano-Fe as feed additive improves the hematological and immunological parameters of fish, *Labeo rohita* H.. *Appl Nanosci* 4, 687–694 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0251-8>
- 16.Kumar, N., Krishnani, K.K. & Singh, N.P. Effect of Dietary Zinc-Nanoparticles on Growth Performance, Anti-Oxidative and Immunological Status of Fish Reared Under Multiple Stressors. *Biol Trace Elem Res* 186, 267–278 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1285-2>
- 17.Tang, Q.Q., Feng, L., Jiang, W.D. et al. Effects of Dietary Copper on Growth, Digestive, and Brush Border Enzyme Activities and Antioxidant Defense of Hepatopancreas and Intestine for Young Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Biol Trace Elem Res* 155, 370–380 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9785-6>
- 18.Hernroth B., Baden S. P., Holm K., André T., Söderhäll I. (2004). Manganese induced immune suppression of the lobster, *nephrops norvegicus*. *Aquat. Toxicol.* 70:3, 223–231. doi: 10.1016/j.aquatox.2004.09.004
- 19.Abarghoei S., Hedayati A., Ghorbani R., Miandareh H. K., Bagheri T. (2016). Histopathological effects of waterborne silver nanoparticles and silver salt on the gills and liver of goldfish *carassius auratus*. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 13 (7), 1753–1760. doi: 10.1007/s13762-016-0972-9
- 20.Liu X. F., Zhang L. M., Guan H. N., Zhang Z. W., Xu S. W. (2013). “Effects of oxidative stress on apoptosis in manganese-induced testicular toxicity in cocks.” *Food & Chemical Toxicology* 60, Complete (2013), 168–176. doi: 10.1016/j.fct.2013.07.058

**REFERENCES**

1. Irina Sergeevna Marchenko Development of aquaculture as a factor of ensuring food security // The Eurasian Union of Scientists. 2015. №11-4 (20).
2. Martos-Sitcha, Juan Antonio et al. "Editorial: Welfare and Stressors in Fish: Challenges Facing Aquaculture." *Frontiers in physiology* vol. 11 162. 25 Feb. 2020, doi:10.3389/fphys.2020.00162
3. Zengin, H. The effects of feeding and starvation on antioxidant defence, fatty acid composition and lipid peroxidation in reared *Oncorhynchus mykiss* fry. *Sci Rep* 11, 16716 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96204-y>
4. Karbyshev, M. S. Biochemistry of oxidative stress: an educational and methodical manual / M. S. Karbyshev, Sh. P. Abdullaev; under the general editorship of A.V. Shespopalov. - Moscow: Publishing House XX, 2018. - 60s.
5. Tunçelli G, Ertik O, Bayrak BB, Memiş D, Yanardag R. Effects of swimming activity and feed restriction on antioxidant and digestive enzymes in juvenile rainbow trout: Implications for nutritional and exercise strategies in aquaculture. *Vet Med Sci*. 2024 May;10(3):e1466. doi: 10.1002/vms3.1466.
6. Ludan V. V., Polskaya L. V. The role of antioxidants in the vital activity of the body. 2019. №3.).
7. Ivakhnenko, V. I. Investigation of the activity of metal-dependent enzymes of antioxidant protection and indicators of lipid peroxidation in rats under the action of nutritional factors: specialty 03.00.04 "Biochemistry" : Abstract for candidate of Biological Sciences / Ivakhnenko, V. I.; State Research Institute of Nutrition of the Russian Academy of Medical Sciences. — Moscow, 2008. — 23 p.
8. Ghasemi, H.A., Hajkhodadadi, I., Hafizi, M. et al. Effect of advanced chelate technology-based trace minerals on growth performance, mineral digestibility, tibia characteristics, and antioxidant status in broiler chickens. *Nutr Metab (Lond)* 17, 94 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00520-5>
9. Karkishchenko N. N., Karkishchenko V. N., Lyublinsky S. L., Kapanadze G. D., Shustov E. B., Revyakin A. O., Bolotskikh L. A., Kasinskaya N. V., Stankova N. V. The role of trace elements in sports nutrition and the safety of metallochelates // *Biomedicine*. 2013. №2.
10. Koshchaev A.G., Gorkovenko N.E., Kosykh A.V., Antipova D.V. Chelated compounds and their use for the correction of microelementosis in farm animals (literature review). *Veterinary medicine today*. 2024;13 (2):136-142.
11. Livshits, V. M. Biochemical analyses in the clinic: a handbook [Text] / V. M. Livshits, V. I. Sinelnikova. — M. : Medical Information Agency, 1998. — p. 303 (20).
12. Bogacheva E. V., Alabovsky V. V., Perov S. Yu. Determination of the concentration of malonic dialdehyde in the serum of rats irradiated with an electromagnetic field of the meter range // *Izv. Sarat. University of Nov. ser. Ser. Chemistry. Biology. Ecology*. 2016. No. 1. ).
13. Yu, H., Zhang, C., Zhang, X., Wang, C., Li, P., Liu, G., et al. (2020). Dietary nano-selenium enhances antioxidant capacity and hypoxia tolerance of grass carp *Ctenopharyngodon idella* fed with high-fat diet. *Aquac. Nutr.* 26, 545–557. doi:10.1111/anu.13016
14. Liu, G. X., Jiang, G. Z., Lu, K. L., Li, X. F., Zhou, M., Zhang, D. D., et al. (2017). Effects of dietary selenium on the growth, selenium status, antioxidant activities, muscle composition and meat quality of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*. *Aquac. Nutr.* 23, 777–787. doi:10.1111/anu.12444
15. Behera, T., Swain, P., Rangacharulu, P.V. et al. Nano-Fe as feed additive improves the hematological and immunological parameters of fish, *Labeo rohita* H. *Appl Nanosci* 4, 687–694 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0251-8>
16. Kumar, N., Krishnani, K.K. & Singh, N.P. Effect of Dietary Zinc-Nanoparticles on Growth Performance, Anti-Oxidative and Immunological Status of Fish Reared Under Multiple Stressors. *Biol Trace Elem Res* 186, 267–278 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1285-2>
17. Tang, Q.Q., Feng, L., Jiang, W.D. et al.

- 
- Effects of Dietary Copper on Growth, Digestive, and Brush Border Enzyme Activities and Antioxidant Defense of Hepatopancreas and Intestine for Young Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*). Biol Trace Elem Res 155, 370–380 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9785-6>
- 18.Hernroth B., Baden S. P., Holm K., André T., Söderhäll I. (2004). Manganese induced immune suppression of the lobster, *nephrops norvegicus*. Aquat. Toxicol. 70:3, 223–231. doi: 10.1016/j.aquatox.2004.09.004
- 19.Abarghoei S., Hedayati A., Ghorbani R., Miandareh H. K., Bagheri T. (2016). Histopathological effects of waterborne silver nanoparticles and silver salt on the gills and liver of goldfish *carassius auratus*. Int. J. Environ. Sci. Technol. 13 (7), 1753–1760. doi: 10.1007/s13762-016-0972-9
- 20.Liu X. F., Zhang L. M., Guan H. N., Zhang Z. W., Xu S. W. (2013). “Effects of oxidative stress on apoptosis in manganese-induced testicular toxicity in cocks.” Food & Chemical Toxicology 60. Complete (2013), 168–176. doi: 10.1016/j.fct.2013.07.058