

Научная статья
УДК 639.3.043.2
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-75-84>
EDN UNYZQT

Элементный статус карпа при введении в рацион биологически активных кормовых добавок

*Елена Петровна Мирошникова, Марина Сергеевна Мингазова[✉],
Азамат Ерсайнович Аринжанов, Юлия Владимировна Килякова*

*Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия, ms.mingazova@gmail.com[✉]*

Аннотация. Карп (*Cyprinus carpio*) – один из самых популярных пресноводных видов рыб, выращиваемых в условиях аквакультуры. Однако существует ряд проблем, связанных с разведением гидробионтов, в том числе с высокой стоимостью корма и ростом количества заболеваний. В качестве предполагаемого решения проблем предлагается дополнительное включение в рацион гидробионтов кормовых добавок. Рассматривается элементный статус карпа при использовании в рационе биологически активных кормовых добавок. В качестве объекта исследования использовали годовиков карпа. Основной учетный период составил 42 суток, в течение которого рыбам дополнительно в корм вводили ванилин (25 мг/кг корма), пробиотик (1 г/кг корма), ультрадисперсные частицы диоксида кремния (УДЧ SiO₂, 200 мг/кг корма), микроэлементы Zn (20 мг/кг корма), I (0,6 мг/кг корма), Cr (2 мг/кг корма), Co (2 мг/кг корма) и их комплексы. Было выявлено влияние кормовых препаратов на концентрацию химических элементов в мышечной ткани карпа. Отмечено, что включение ванилина в рацион карпа способствовало повышению концентрации макро- и микроэлементов: Ca ($P \leq 0,05$), Na ($P \leq 0,01$), Fe ($P \leq 0,05$), Ni ($P \leq 0,05$), Mo ($P \leq 0,05$) относительно контроля. Пробиотики воздействовали на содержание таких элементов, как Ca ($P \leq 0,05$), Na ($P \leq 0,05$), Se ($P \leq 0,05$) и I ($P \leq 0,05$), при снижении концентрации Cr ($P \leq 0,05$). Совместное использование ванилина и пробиотика привело к повышению содержания Na ($P \leq 0,01$) и к снижению Cr ($P \leq 0,01$). Комплекс, состоящий из ванилина + УДЧ SiO₂ + пробиотика, способствовал повышению концентрации K ($P \leq 0,05$) и Na ($P \leq 0,01$) при снижении B ($P \leq 0,05$), Se ($P \leq 0,05$) и Mo ($P \leq 0,05$). Дополнительное применение в рационе карпа ванилина + УДЧ SiO₂ + микроэлементов (Zn, I, Cr, Co) отразилось на повышении уровня K ($P \leq 0,05$) и Na ($P \leq 0,01$), при этом B ($P \leq 0,01$) и Se ($P \leq 0,05$) снижались по сравнению с контрольными значениями. После использования биологически активных кормовых добавок концентрация ряда токсических элементов в тканях карпа снижалась до 94,3 % ($P \leq 0,001$) по сравнению с контрольными значениями. Таким образом, дополнительное применение кормовых препаратов в рационе рыб связано с улучшением элементного статуса при общем росте содержания макро- и микроэлементов и снижении концентрации токсических элементов. Наибольшее положительное отличие было зафиксировано в группе, где рыбам дополнительно вводили в рацион ванилин.

Ключевые слова: аквакультура, карп, кормление, элементный статус, ванилин, пробиотик, ультрадисперсные частицы, микроэлементы

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№ 075-15-2024-550).

Для цитирования: *Мирошникова Е. П., Мингазова М. С., Аринжанов А. Е., Килякова Ю. В.* Элементный статус карпа при введении в рацион биологически активных кормовых добавок // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство.* 2025. № 1. С. 75–84. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-75-84>. EDN UNYZQT.

Original article

The elemental status of carp when biologically active feed additives are introduced into the diet

*Elena P. Miroshnikova, Marina S. Mingazova[✉],
Azamat E. Arinzhanov, Yuliya V. Kilyakova*

*Orenburg State University,
Orenburg, Russia, ms.mingazova@gmail.com[✉]*

Abstract. Carp (*Cyprinus carpio*) is one of the most popular freshwater fish species grown in aquaculture. However, there are a number of problems associated with the breeding of aquatic organisms, including due to the high cost of feed and the increase in the number of diseases. Among the proposed solutions to the problems is the additional inclusion of feed additives in the diet of aquatic organisms. The article examines the elemental status of carp when biologically active feed additives are used in the diet. Yearlings of carp were used as an object. The main accounting period was 42 days, during which the fish were additionally given vanillin (25 mg/kg of feed), probiotic (1 g/kg of feed), ultrafine particles of silicon dioxide (UFP SiO₂) (200 mg/kg of feed), trace elements (Zn (20 mg/kg of feed), I (0.6 mg/kg of feed), Cr (2 mg/kg of feed), Co (2 mg/kg of feed)) and their complexes. The effect of feed preparations on the concentration of chemical elements in carp muscle tissue was revealed. It was noted that the inclusion of vanillin in the diet of carp contributed to an increase in the concentration of macro- and microelements: Ca ($P \leq 0.05$), Na ($P \leq 0.01$), Fe ($P \leq 0.05$), Ni ($P \leq 0.05$), Mo ($P \leq 0.05$) relative to the control. Probiotics affected the content of elements such as Ca ($P \leq 0.05$), Na ($P \leq 0.05$), Se ($P \leq 0.05$) and I ($P \leq 0.05$), with a decrease in Cr ($P \leq 0.05$). The combined use of vanillin and probiotic resulted in an increase in Na ($P \leq 0.01$) and a decrease in Cr ($P \leq 0.01$). The complex consisting of vanillin + ultrafine particles SiO₂ + probiotic contributed to an increase in the concentration of K ($P \leq 0.05$) and Na ($P \leq 0.01$), with a decrease in B ($P \leq 0.05$), Se ($P \leq 0.05$) and Mo ($P \leq 0.05$). The additional use of vanillin + ultrafine particles SiO₂ + trace elements (Zn, I, Cr, Co) in the diet of carp was reflected in an increase in the levels of K ($P \leq 0.05$) and Na ($P \leq 0.01$), while B ($P \leq 0.01$) and Se ($P \leq 0.05$) decreased compared with the control values. After using biologically active feed additives, the concentration of toxic elements in carp tissues decreased to 94.3 % ($P \leq 0.001$) compared with the control values. Thus, the additional use of feed preparations in the fish diet is associated with an improvement in the elemental status, with an overall increase in macro- and microelements and a decrease in toxic ones. A general increase in the content of macro- and microelements was revealed, with a decrease in toxic elements. The greatest positive difference was recorded in the group where the fish were additionally injected with vanillin.

Keywords: aquaculture, carp, feeding, elemental status, vanillin, probiotic, ultrafine particles, trace elements

Acknowledgment: the research was carried out with the financial support of a grant for large scientific projects in priority areas of scientific and technical development (No. 075-15-2024-550).

For citation: Miroshnikova E. P., Mingazova M. S., Arinzhanov A. E., Kilyakova Yu. V. The elemental status of carp when biologically active feed additives are introduced into the diet. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry.* 2025;1:75-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-1-75-84>. EDN UNYZQT.

Введение

В настоящее время аквакультура – самая быстрорастущая отрасль пищевой промышленности, где производство варьируется от небольших частных прудов до крупномасштабных заводов. Аквакультура занимается выращиванием как рыб, так и других гидробионтов (моллюсков, ракообразных и пр.). Производство позволяет обеспечивать население высококачественными белками, липидами, углеводами, витаминами и микроэлементами [1, 2]. В аквакультуре при выращивании рыб необходимо использовать сбалансированные корма для поддержания оптимального роста и эффективности производства. Для этого необходимо, чтобы в корма входили высококачественные компоненты, витамины и минералы [3], при этом в составе комбикорма должен учитываться принцип биодоступности компонентов и их взаимодействия друг с другом [4].

Применение биологически активных кормовых добавок в рационах сельскохозяйственных животных позволяет повысить эффективность кормления, улучшить выживаемость и уменьшить число заболеваний. Ряд кормовых препаратов, например ультрадисперсные частицы (УДЧ), могут связывать и удалять токсины или патогенные микроорганизмы [5]. Ультрадисперсные частицы имеют высокое соотношение площади поверхности к объему, за счет чего вещества химически могут быть гораздо более активными, что повышает их биодоступность, улучшая усвоение и метаболизм [6]. Наиболее изученными и широко применяемыми добавками в аквакультуре являются пробиотики,

которые при включении в корм способствуют повышению устойчивости к болезням, улучшают состояние здоровья, показатели роста, усвоение корма и микробный баланс организма-хозяина. Наиболее часто используются молочнокислые бактерии (*Lactobacillus*), являющиеся частью естественной микробиоты кишечника и оказывающие положительное действие на пищеварительную систему. Кроме того, пробиотики воздействуют на выработку ингибирующих веществ, способных подавлять рост патогенной микрофлоры [7].

Исследование ингибиторов кворум сенсинга бактерий направлено на выявление ряда препаратов, способных благоприятно отразиться на физиологическом состоянии организма за счет влияния на экспрессию генов патогенных микроорганизмов. К веществам анти-кворума относятся и пробиотики, и ультрадисперсные частицы, и ряд других кормовых добавок, например ванилин. Он способен оказывать противомикробное действие и подавлять рост *Vibrio harveyi* и *Vibrio anguillarum*, а также проникать в мембрану и разрушать ее из-за ароматической структуры [8, 9].

Рыбы в основном получают микроэлементы из рациона и воды, при этом добавки с микроэлементами в рационе рыб необходимы. Они могут выступать в качестве катализаторов в ферментных и эндокринных системах. Большая часть белков нуждаются в ко-факторе, содержащем микроэлемент. Также микроэлементы принимают участие в метаболических процессах – переваривании белков, выработке энергии, делении клеток – и в антиокси-

дантной активности. Дополнительное включение микроэлементов в рацион рыб влияет на улучшение физиологического состояния организма, повышение прироста и уменьшение числа заболеваний за счет стимулирования иммунного ответа [10].

В связи с этим исследования по применению различных кормовых добавок и их комплексов являются актуальными. При этом необходимо полное изучение влияния препаратов на организм рыб, в том числе на рост, гематологические параметры и на состояние мышечной ткани гидробионтов. Выявление концентрации химических элементов в тканях рыб отражает способность гидробионтов биоаккумуляции те или иные элементы и передавать их по пищевой цепочке.

Цель исследований – изучить элементный статус карпа (*Cyprinus carpio*) в связи с использованием в рационе биологически активных кормовых добавок.

Материалы и методы

Эксперимент проведен в летний период 2024 г. в Оренбургском государственном университете на кафедре биотехнологии животного сырья и аквакультуры на модели карпа (97 ± 2 г, $n = 9$). Учетный период составил 42 суток. Рыб содержали в условиях аквариумного стенда, оснащенного системой фильтрации и насыщения воды кислородом. Температура воды поддерживалась в диапазоне 25 ± 2 °С.

Кормление рыб осуществлялось 4 раза в светлое время суток через равные промежутки времени. Норма кормления составила от 2 до 5 % от массы тела. Расчет проводили еженедельно после взвешивания рыб. Биологически активные кормовые добавки были нанесены на комбикорм путем напыления.

Исследования по изучению влияния биологически активных кормовых добавок представлены на схеме (рис. 1).

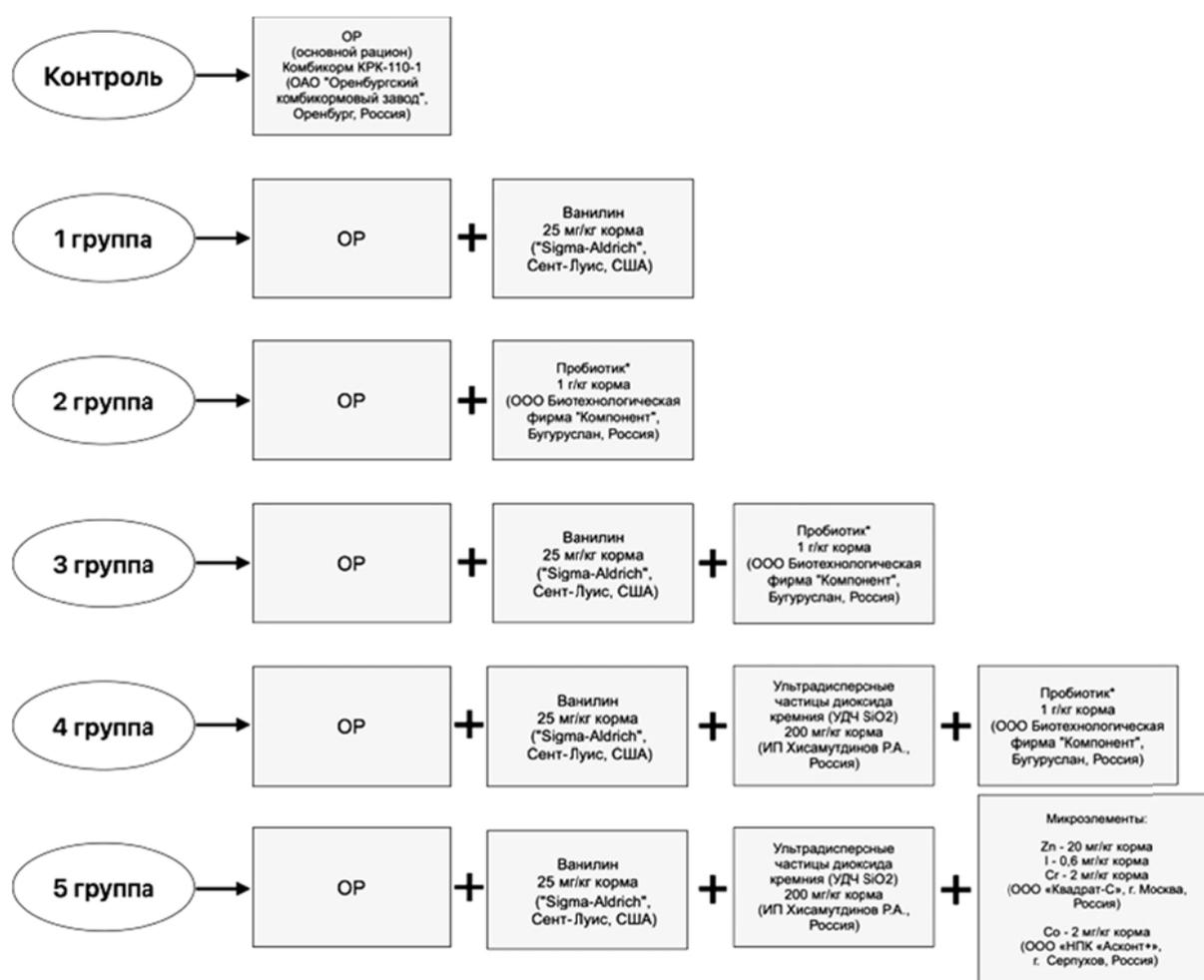


Рис. 1. Схема эксперимента: «*» – пробиотик на основе штаммов *Enterococcus faecium* ($2 \cdot 10^{10}$ КОЕ), *Lactobacillus plantarum* ($1 \cdot 10^5$ КОЕ), *Lactobacillus buchneri* ($1 \cdot 10^5$ КОЕ), *Propionibacterium freudenreichii* subsp. Shermanii ($2 \cdot 10^8$ КОЕ), *Bifidobacterium bifidum* ($1 \cdot 10^9$ КОЕ)

Fig. 1. Experimental scheme: “*” is a probiotic based on *Enterococcus faecium* strains ($2 \cdot 10^{10}$ CFU), *Lactobacillus plantarum* ($1 \cdot 10^5$ CFU), *Lactobacillus buchneri* ($1 \cdot 10^5$ CFU), *Propionibacterium freudenreichii* subsp. Shermanii ($2 \cdot 10^8$ CFU), *Bifidobacterium bifidum* ($1 \cdot 10^9$ CFU)

Мышечная ткань была отобрана с применением стерильных инструментов в последний день исследования. Дальнейший анализ был проведен в лаборатории АНО «Центр биотической медицины», г. Москва (лицензия МДКЗ 18097/9556). Результаты представлены по 31 показателю.

Опытные группы сравнивались с контрольной группой с помощью пакета программ Microsoft Office (Microsoft, США) и программы Statistica 10.0 (Stat Soft Inc., США).

Результаты и обсуждение

Изучение химического пула макро- и микроэлементов мышечной ткани является важным фактором

при оценке пищевой ценности рыб. При этом должно оцениваться содержание не только макро- и эссенциальных микроэлементов, но также и условно-эссенциальных и в особенности токсических элементов. В первую очередь, их концентрация в тканях гидробионтов зависит от окружающей среды и физиологического состояния рыб [11]. Изменение элементного состава тканей может привести как к улучшению иммунитета, прироста и снижению ряда заболеваний, так и к негативным последствиям для организма [12]. Установлено, что введение в рацион карпа биологически активных кормовых добавок и их комплексов отразилось на элементном статусе подопытных рыб (рис. 2).

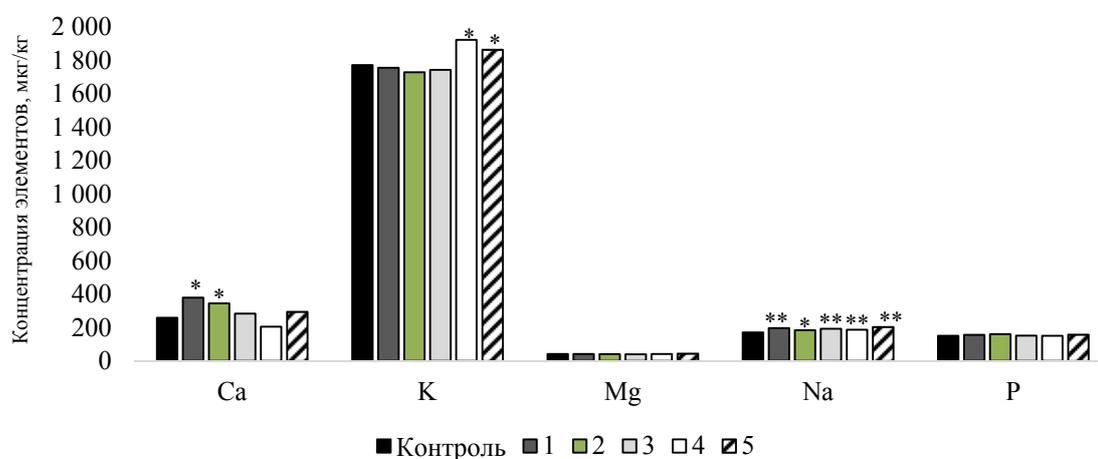


Рис. 2. Концентрация макроэлементов в тканях карпа, мкг/кг: различия с контролем при * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$

Fig. 2. Concentration of macronutrients in carp tissues, mcg/kg: differences with the control in * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$

Натрий, кальций и калий являются жизненно важными макроэлементами. При изучении концентрации макроэлементов (см. рис. 2) установлено, что содержание Na во всех группах увеличивалось. Так, в 5 группе зафиксировано наибольшее повышение (на 19,4 % ($P \leq 0,01$)) по сравнению с контролем. В других группах концентрация Na повышалась от 8,2 % ($P \leq 0,05$) до 15,3 % ($P \leq 0,01$). Натрий регулирует количество воды во внеклеточном пространстве посредством осмотических гомеостатических процессов и совместно с K регулирует общее количество воды в организме. Кроме того, K вносит значительный вклад во внутриклеточную осмолярность и играет важную роль в деятельности нервной системы [13]. Повышение концентрации K было зафиксировано в 4 группе на 8,5 % ($P \leq 0,05$) и в 5 группе – на 5,2 % ($P \leq 0,05$).

Кроме того, в 1 и 2 группах отмечалось увеличение концентрации Ca по сравнению с контролем на 46,9 % ($P \leq 0,05$) и 33,3 % ($P \leq 0,05$) соответ-

ственно. Кальций является ко-фактором для многих ферментов и выступает посредником в сигнальных реакциях мышц и нервов, передает импульсы и оказывает влияние при делении клеток и свертывании крови [13].

Эссенциальные и условно-эссенциальные микроэлементы (рис. 3) показали следующие результаты. Согласно предыдущим исследованиям [14], включение некоторых микроэлементов в кормление рыб способствует повышению количества данных элементов в мышцах рыб. Включение в рацион 5 группы микроэлементов Zn, I, Cr и Co в нашем исследовании не привело к изменениям в концентрации данных показателей. При этом установлено, что использование в рационе пробиотика и комплекса ванилин + пробиотик привело к снижению содержания хрома на 32,7 % ($P \leq 0,05$) и 69,4 % ($P \leq 0,01$) соответственно, а уровень йода во 2 группе повышался на 84,8 % ($P \leq 0,05$). До 80 % йода попадает в организм рыб с водой, однако его биодос-

тупность изменяется под влиянием рациона [11]. Если о влиянии I на организм рыб известно много, то воздействие Cr на рыб изучено неполностью. Ранее сообщалось, что хром оказывает антиокси-

дантное действие и влияет на липидный обмен, но его недостаток или отсутствие в рационе могут не приводить к негативным последствиям для организма [15].

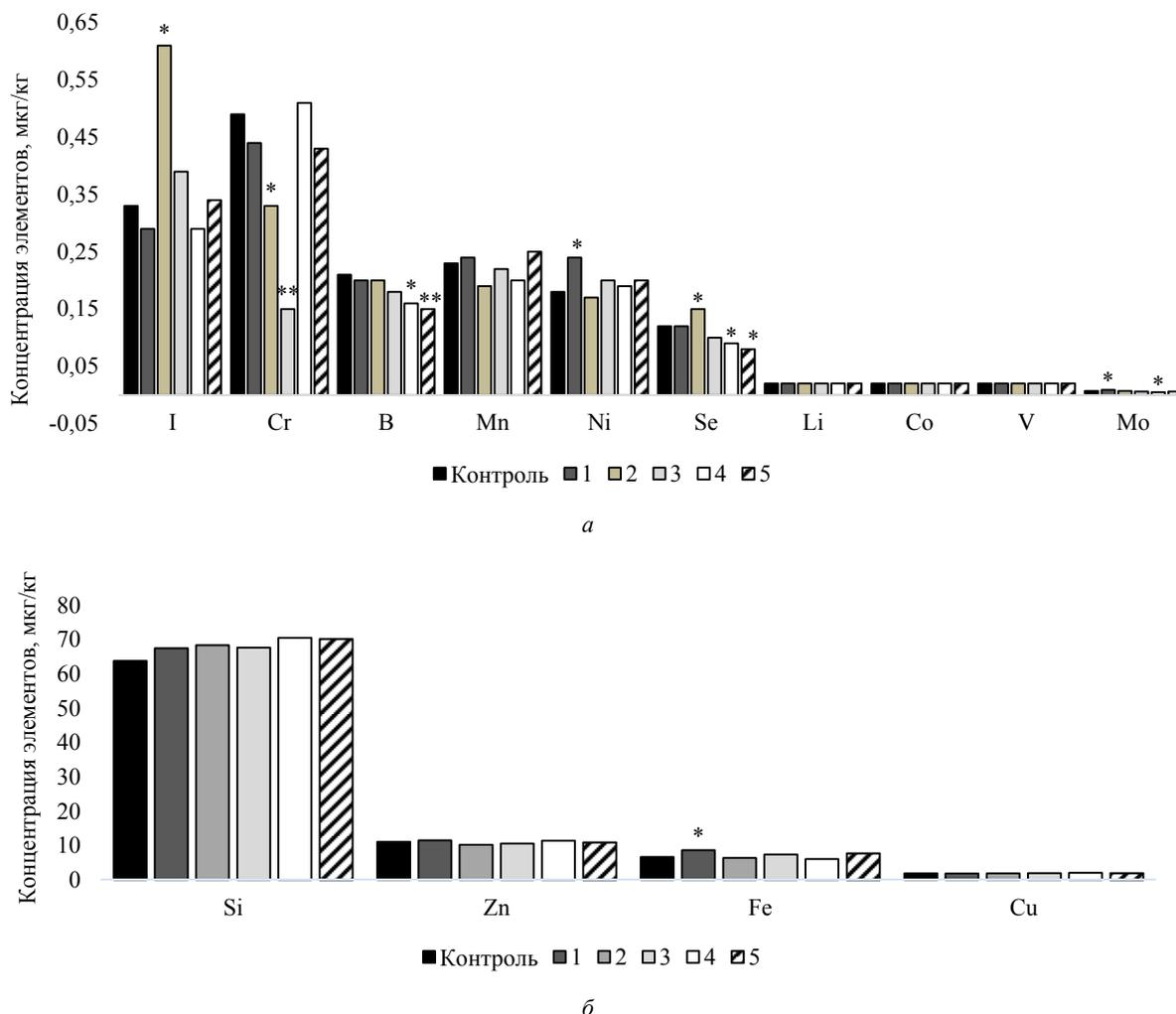


Рис. 3. Концентрация эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов в тканях карпа, мкг/кг: различия с контролем при * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$: а – I, Cr, B, Mn, Ni, Se, Li, Co, V, Mo; б – Si, Zn, Fe, Cu

Fig. 3. Concentration of essential and conditionally essential trace elements in carp tissues, mcg/kg: differences with the control in * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$: a – I, Cr, B, Mn, Ni, Se, Li, Co, V, Mo; б – Si, Zn, Fe, Cu

Кроме того, в 5 группе было зафиксировано снижение B – на 28,6 % ($P \leq 0,01$) и Se – на 33,3 % ($P \leq 0,05$). Похожий эффект выявлен и в 4 группе, в которой отмечалось снижение B – на 23,8 % ($P \leq 0,05$), Se – на 25 % ($P \leq 0,05$) и Mo – на 28,6 % ($P \leq 0,05$). Только во 2 группе концентрация Se повышалась на 25 % ($P \leq 0,05$). Основным путем поглощения Se является желудочно-кишечный тракт. Селен связывается с белками в плазме и транспортируется в ткани, причем в мышечной ткани содержится наибольшая часть запасов этого элемента в организме. Биологические функции B

четко не определены [16, 17].

Отличительные результаты были получены в 1 группе, в рацион которой дополнительно включали ванилин. Концентрация Fe, Ni и Mo повышалась на 29,7 % ($P \leq 0,05$), 33,3 % ($P \leq 0,05$) и 28,6 % ($P \leq 0,05$) соответственно. Железо – значимый компонент, который задействован в биохимических процессах организма. В частности, Fe участвует в передаче электронов, контролирует активность генов, помогает транспортировать кислород и регулирует рост и деление клеток. Его повышение отмечают при увеличении массы рыб, что отражает биоаккумуляцию и биоуси-

ление действия элемента [18, 19]. Считается, что желудочно-кишечный тракт – это основной орган, где происходит усвоение железа. В желудке железо высвобождается из пищи благодаря кислой среде [16]. Можно предположить, что ванилин способен усилить этот процесс и повысить концентрацию Fe в мышечной ткани рыб.

Несмотря на то, что Cu является метаболическим антагонистом Fe, в нашем исследовании не было отмечено достоверного различия между концентрацией Cu в опытных группах и контроле. В последних литературных источниках [11] указывалось на сбалансированность содержания этих

элементов в тканях гидробионтов и на отсутствие антагонистического эффекта между элементами.

Содержание токсических элементов в организме рыб зависит от их концентрации в окружающей среде и биодоступности, а также от вида, стадии развития, физиологического состояния и условий кормления рыб [20]. Интоксикация организма тяжелыми металлами может проявляться различными физиологическими, биохимическими, клеточными и молекулярными изменениями [21]. Включение биологически активных кормовых добавок в рацион карпа отразилось на уровне токсических элементов в мышечной ткани (рис. 4).

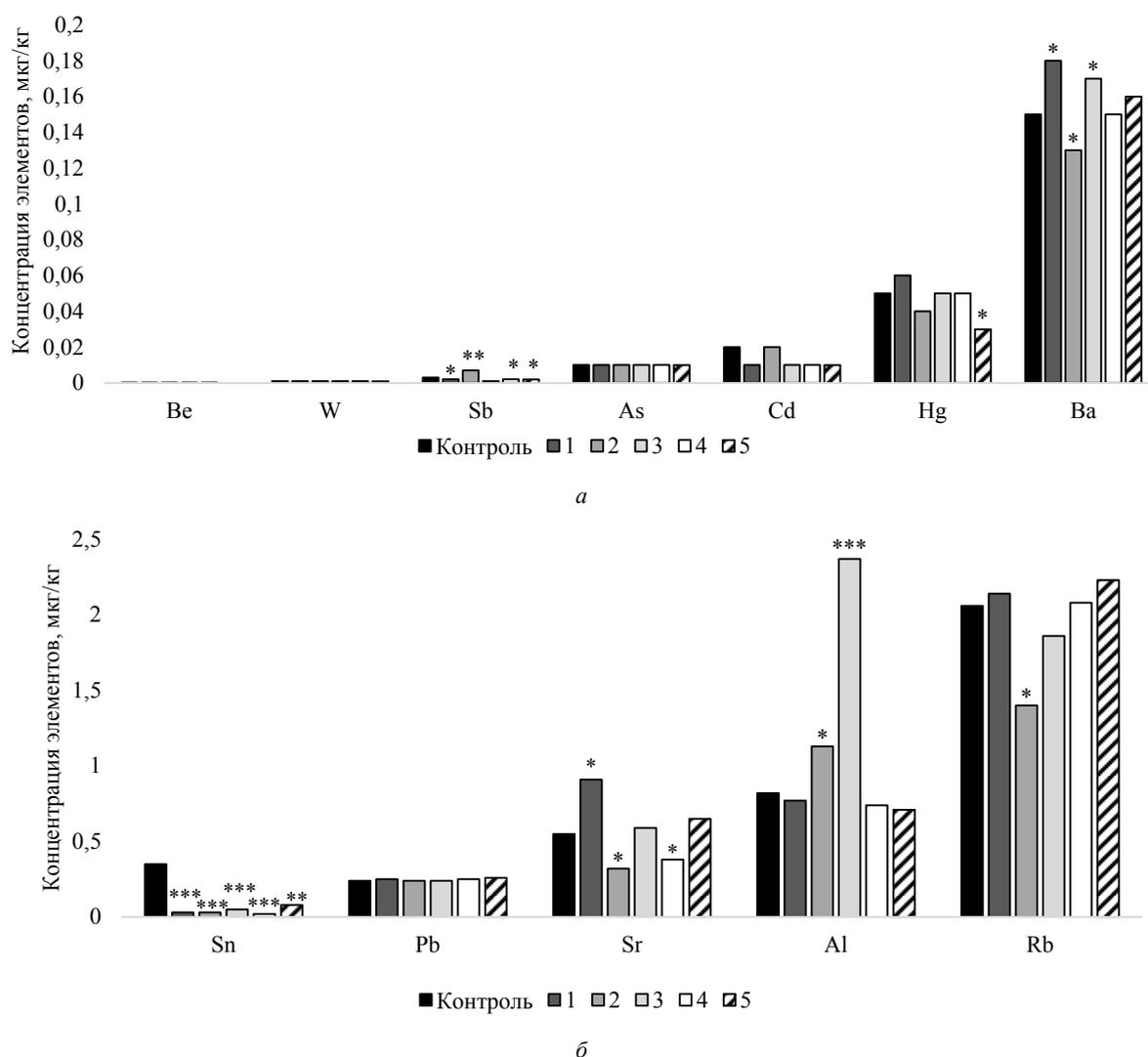


Рис. 4. Концентрация токсических и малоизученных элементов в тканях карпа, мкг/кг: различия с контролем при * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$; а – Be, W, Sb, As, Cd, Hg, Ba; б – Sn, Pb, Sr, Al, Rb

Fig. 4. Concentration of toxic and poorly studied elements in carp tissues, mcg/kg: differences with control at * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$; a – Be, W, Sb, As, Cd, Hg, Ba; б – Sn, Pb, Sr, Al, Rb

Дополнительное использование кормовых добавок в рационах рыб способствовало снижению ряда токсических элементов в мышечных тканях [22]. В настоящем исследовании было расширено число показателей токсических элементов, при этом явные изменения были отмечены во 2 и 3 группах. В то же время в 4 и 5 группах отмечалось исключительно снижение концентрации токсических элементов.

Наиболее опасными тяжелыми металлами являются Pb, Hg, Cd и As, содержание которых в мышечной ткани приводит к аккумуляции металлов и их передаче по пищевой цепочке [23]. Нами выявлено, что концентрация Pb, Cd и As в опытных группах и контроле не имела достоверных различий. Содержание Hg имело достоверные отличия только в 5 группе, где уровень Hg снижался на 40 % ($P \leq 0,05$) относительно контроля.

В нашем исследовании самая высокая концентрация токсических элементов была в 3 группе, где зафиксировали наибольшее повышение Al – в 2,9 раза ($P \leq 0,001$) по отношению к контролю. Повышение Al вызывает стресс и отражается на метаболических изменениях в мышечной ткани рыб, чтобы справиться с уменьшением газообмена при дыхании и сохранить двигательную активность [24]. Также повышение было отмечено для уровня Ba, который был на 13,3 % ($P \leq 0,05$) выше контроля. Концентрация Al повышалась и во 2 группе (на 37,8 % ($P \leq 0,05$)), в то же время снижался уровень Ba ($P \leq 0,05$) и увеличивался уровень Sb ($P \leq 0,05$). В других опытных группах концентрация Sb сократилась до 66,7 % ($P \leq 0,01$). Высокие концентрации Sb могут привести к окислительному стрессу и снижению функций ор-

ганизма у рыб, однако для негативных последствий концентрация Sb в тканях рыб должна быть значительно выше, чем была в наших исследованиях [25]. При этом относительно мало известно об уровне Sn и Sr [26]. Во всех опытных группах установлено снижение концентрации Sn от 77,1 % ($P \leq 0,01$) до 94,3 % ($P \leq 0,001$). Вместе с тем в 1 группе повышался уровень Sr – до 65,6 % ($P \leq 0,05$) по отношению к контролю, однако содержание Sr во 2 и 4 группах снижалось до 41,8 % ($P \leq 0,05$). Следует отметить, что стронций является важным элементом для формирования чешуи у рыб [26].

Заключение

По итогам проведенного исследования можно сделать вывод, что представленные в рационе карпа биологически активные кормовые добавки не оказали негативного воздействия на элементный статус. Мышечная ткань рыб пригодна для употребления в пищу и не представляет опасности для здоровья человека. Более того, наиболее токсичные элементы (Pb, Cd, As, Hg) были обнаружены в незначительном количестве. В то же время содержание макроэлементов, эссенциальных и условно-эссенциальных элементов повышалось в опытных группах, в том числе отмечено увеличение концентрации Ca, K, Na, I, Fe.

Наиболее отличительные результаты были получены в 1 группе, которая дополнительно с основным рационом получала ванилин. Так, ванилин способствовал повышению концентрации жизненно необходимых элементов – Ca, K, Fe, Ni, в то же время снижая содержание Sb и Sn.

Список источников

1. Fiorella K. J., Okronipa H., Baker K., Heilpern S. Contemporary aquaculture: implications for human nutrition // Current Opinion In Biotechnology. 2021. V. 70. P. 83–90.
2. Dawood M. A. O., Alagawany M., Sewilam H. The Role of Zinc Microelement in Aquaculture: a Review // Biological Trace Element Research. V. 200 (8). P. 3841–3853.
3. Ning L., Tan Y., Wang W. X., Wu S., Chen F., Zhang H., Pan Q. Optimum selenium requirement of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* // Aquaculture Nutrition. 2021. V. 26. Iss. 2. P. 528–535.
4. Prabhu P. A. J., Silva M. S., Kröeckel S., Holme M.-H., Ørnstrud R., Amlund H., Lock E.-J., Waagbø R. Effect of levels and sources of dietary manganese on growth and mineral composition of post-smolt Atlantic salmon fed low fish meal, plant-based ingredient diets // Aquaculture. 2019. V. 512. P. 734287.
5. Sekhon B. S. Nanotechnology in agri-food production: an overview // Nanotechnology Sciences and Applications. 2014. V. 7. P. 31–53.
6. Silva V. F., Mourinho J. L. P., Martins M. L., Carvalho P. L. P. F., Rodrigues E. D., Gatlin 3rd D. M., Griffin M. J., Older C. E., Yamamoto F. Y. Dietary supplementation of mineral nanoparticles for channel catfish (*Ictalurus punctatus*) // Fish Physiology and Biochemistry. 2024. V. 50 (6). P. 2225–2236. DOI: 10.1007/s10695-024-01378-7.
7. Ratvaj M., Maruščáková I. C., Popelka P., Fečkaninová A., Koščová J., Chomová N., Mareš J., Malý O., Žitňan R., Faldyna M., Mudroňová D. Feeding-Regime-Dependent Intestinal Response of Rainbow Trout after Administration of a Novel Probiotic Feed // Animals (Basel). 2023. V. 13 (12). P. 1892.
8. Ibrahim D., Kishawy A. T. Y., Khater S. I., Khalifa E., Ismail T. M., Mohammed H. A., Elnahriry S. S., Tolba H. A., Sherief W. R. I. A., Farag M. F. M., Abd El-Hamid M. I. Interactive effects of dietary quercetin nanoparticles on growth, flesh antioxidant capacity and transcription of cytokines and *Aeromonas hydrophila* quorum sensing orchestrating genes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) // Fish & Shellfish Immunology. 2021. V. 119. P. 478–489.
9. Rossi B., Esteban M. A., Garcia-Beltran J. M., Giovagnoni G., Cuesta A., Piva A., Grilli E. Antimicrobial Power of Organic Acids and Nature-Identical Compounds against Two *Vibrio* spp.: An In Vitro Study // Microorganisms. 2021. V. 9 (5). P. 966.
10. Mohan K., Ravichandran S., Muralisankar T., Uthayakumar V., Chandirasekar R., Seedeve P., Abirami R. G., Rajan D. K. Application of marine-derived polysaccharides as immunostimulants in aquaculture: A review of current

knowledge and further perspectives // *Fish & Shellfish Immunology*. 2019. V. 86. P. 1177–1193.

11. Pinto F. R., Duarte A. M., Silva F., Barroso S., Mendes S., Pinto E., Almeida A., Sequeira V., Vieira A. R., Gordo L. S., Gil M. M. Annual variations in the mineral element content of five fish species from the Portuguese coast // *Food Research International*. 2022. V. 158. P. 111482.

12. López-Berenguer G., Peñalver J., Martínez-López E. A critical review about neurotoxic effects in marine mammals of mercury and other trace elements // *Chemosphere*. 2020. V. 246. P. 125688.

13. Zoroddu M. A., Aaseth J., Crisponi G., Medici S., Peana M., Nurchi V. M. The essential metals for humans: a brief overview // *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2019. V. 195. P. 120–129.

14. Арижанова М. С., Мирошникова Е. П., Арижанов А. Е., Килякова Ю. В. Биологическое действие ультрадисперсных частиц SiO₂, пробиотического препарата Бифидобиом и комплекса микроэлементов на организм карпа // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. Т. 106. № 1. С. 48–66.

15. Vincent J. B. New Evidence against Chromium as an Essential Trace Element // *The Journal of nutrition*. 2017. V. 147. Iss. 12. P. 2212–2219.

16. Lall S. P., Kaushik S. J. Nutrition and Metabolism of Minerals in Fish // *Animals*. 2021. V. 11. Iss. 9. P. 2711.

17. Wischhusen P., Parailoux M., Geraert P.-A., Briens M., Bueno M., Mounicou S., Bouyssiere B., Prabhu P. A. J., Kaushik S. J., Fauconneau B., Fontagné-Dicharry S. Effect of dietary selenium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) broodstock on antioxidant status, its parental transfer and oxidative status in the progeny // *Aquaculture*. 2019. V. 507. P. 126–138.

18. Lozano-Bilbao E., Jurado-Ruzafa A., Lozano G., Jiménez S., Hardisson A., Rubio C., Weller D. G., Paz S., Gutiérrez A. J. Development stage and season influence in the metal content of small pelagic fish in the North-West Africa // *Chemosphere*. 2020. V. 261. P. 127692.

19. Duarte A. M., Silva F., Mendes S., Pinto F. R., Barro-

so S., Silva E., Neves A., Sequeira V., Magalhães M. F., Rebelo R., Assis C., Vieira A. R., Gordo L. S., Gil M. M. Seasonal study of the nutritional composition of unexploited and low commercial value fish species from the Portuguese coast // *Food Science & Nutrition*. 2022. V. 10. Iss. 10. P. 3368–3379.

20. Varol M., Sünbül M. R. Macroelements and toxic trace elements in muscle and liver of fish species from the largest three reservoirs in Turkey and human risk assessment based on the worst-case scenarios // *Environmental Research*. 2020. V. 184. P. 109298.

21. Phoonaploy U., Tengjaroenkul B., Neeratanaphan L. Effects of electronic waste on cytogenetic and physiological changes in snakehead fish (*Channa striata*) // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. V. 191. P. 363.

22. Мингазова М. С., Мирошникова Е. П., Арижанов А. Е., Килякова Ю. В. Концентрация химических элементов в мышечной ткани карпа при включении в рацион биологически активных веществ // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. Т. 106. № 4. С. 18–29.

23. Shahjahan M., Taslima K., Rahman M. S., Al-Emran M., Alam S. I., Faggio C. Effects of heavy metals on fish physiology – A review // *Chemosphere*. 2022. V. 300. P. 134519.

24. Napolitano G., Capriello T., Venditti P., Fasciolo G., La Pietra A., Trifuoggi M., Giarra A., Agnisola C., Ferrandino I. Aluminum induces a stress response in zebrafish gills by influencing metabolic parameters, morphology, and redox homeostasis // *Comparative Biochemistry and Physiology. Toxicology & Pharmacology*. 2023. V. 271. P. 109633.

25. Zou H.-T., Xu K., Yang A., Hu X., Niu A., Li Q. Antimony accumulation in zebrafish (*Danio rerio*) and its effect on genotoxicity, histopathology, and ultrastructure // *Aquatic Toxicology*. 2022. V. 252. P. 106297.

26. Kumar N., Bhushan S., Gupta S. K., Kumar P., Chandan N. K., Singh D. K., Kumar P. Metal determination and biochemical status of marine fishes facilitate the bio-monitoring of marine pollution // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. V. 170. P. 112682.

References

1. Fiorella K. J., Okronipa H., Baker K., Heilpern S. Contemporary aquaculture: implications for human nutrition. *Current Opinion In Biotechnology*, 2021, vol. 70, pp. 83-90.

2. Dawood M. A. O., Alagawany M., Sewilam H. The Role of Zinc Microelement in Aquaculture: a Review. *Biological Trace Element Research*, vol. 200 (8), pp. 3841-3853.

3. Ning L., Tan Y., Wang W. X., Wu S., Chen F., Zhang H., Pan Q. Optimum selenium requirement of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Nutrition*, 2021, vol. 26, iss. 2, pp. 528-535.

4. Prabhu P. A. J., Silva M. S., Kröeckel S., Holme M.-H., Ørnstrud R., Amlund H., Lock E.-J., Waagbø R. Effect of levels and sources of dietary manganese on growth and mineral composition of post-smolt Atlantic salmon fed low fish meal, plant-based ingredient diets. *Aquaculture*, 2019, vol. 512, p. 734287.

5. Sekhon B. S. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology Sciences and Applications*, 2014, vol. 7, pp. 31-53.

6. Silva V. F., Mourião J. L. P., Martins M. L., Carvalho P. L. P. F., Rodrigues E. D., Gatlin 3rd D. M., Griffin M. J., Older C. E., Yamamoto F. Y. Dietary supplementation of mineral nanoparticles for channel catfish (*Ictalurus puncta-*

tus). *Fish Physiology and Biochemistry*, 2024, vol. 50 (6), pp. 2225-2236. DOI: 10.1007/s10695-024-01378-7.

7. Ratvaj M., Marušćáková I. C., Popelka P., Fečkaninová A., Koščová J., Chomová N., Mareš J., Malý O., Žitňan R., Faldyna M., Mudroňová D. Feeding-Regime-Dependent Intestinal Response of Rainbow Trout after Administration of a Novel Probiotic Feed. *Animals (Basel)*, 2023, vol. 13 (12), p. 1892.

8. Ibrahim D., Kishawy A. T. Y., Khater S. I., Khalifa E., Ismail T. M., Mohammed H. A., Elnahriry S. S., Tolba H. A., Sherief W. R. I. A., Farag M. F. M., Abd El-Hamid M. I. Interactive effects of dietary quercetin nanoparticles on growth, flesh antioxidant capacity and transcription of cytokines and *Aeromonas hydrophila* quorum sensing orchestrating genes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish & Shellfish Immunology*, 2021, vol. 119, pp. 478-489.

9. Rossi B., Esteban M. A., Garcia-Beltran J. M., Giovagnoni G., Cuesta A., Piva A., Grilli E. Antimicrobial Power of Organic Acids and Nature-Identical Compounds against Two *Vibrio* spp.: An In Vitro Study. *Microorganisms*, 2021, vol. 9 (5), p. 966.

10. Mohan K., Ravichandran S., Muralisankar T., Uthayakumar V., Chandirasekar R., Seedeve P., Abirami R. G., Rajan D. K. Application of marine-derived polysaccharides

as immunostimulants in aquaculture: A review of current knowledge and further perspectives. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, vol. 86, pp. 1177-1193.

11. Pinto F. R., Duarte A. M., Silva F., Barroso S., Mendes S., Pinto E., Almeida A., Sequeira V., Vieira A. R., Gordo L. S., Gil M. M. Annual variations in the mineral element content of five fish species from the Portuguese coast. *Food Research International*, 2022, vol. 158, p. 111482.

12. López-Berenguer G., Peñalver J., Martínez-López E. A critical review about neurotoxic effects in marine mammals of mercury and other trace elements. *Chemosphere*, 2020, vol. 246, p. 125688.

13. Zoroddu M. A., Aaseth J., Crisponi G., Medici S., Peana M., Nurchi V. M. The essential metals for humans: a brief overview. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2019, vol. 195, pp. 120-129.

14. Arinzhanova M. S., Miroshnikova E. P., Arinzhanov A. E., Kilyakova Yu. V. Biologicheskoe dejstvie ul'tradispersnyh chastic SiO₂, probioticheskogo preparata Bifidobiom i kompleksa mikroelementov na organizm karpa [The biological effect of ultrafine SiO₂ particles, the probiotic drug Bifidobiom and a complex of microelements on the body of carp]. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*, 2023, vol. 106, no. 1, pp. 48-66.

15. Vincent J. B. New Evidence against Chromium as an Essential Trace Element. *The Journal of nutrition*, 2017, vol. 147, iss. 12, pp. 2212-2219.

16. Lall S. P., Kaushik S. J. Nutrition and Metabolism of Minerals in Fish. *Animals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 2711.

17. Wischhusen P., Parailoux M., Geraert P.-A., Briens M., Bueno M., Mounicou S., Bouyssiére B., Prabhu P. A. J., Kaushik S. J., Fauconneau B., Fontagné-Dicharry S. Effect of dietary selenium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) broodstock on antioxidant status, its parental transfer and oxidative status in the progeny. *Aquaculture*, 2019, vol. 507, pp. 126-138.

18. Lozano-Bilbao E., Jurado-Ruzafa A., Lozano G., Jiménez S., Hardisson A., Rubio C., Weller D. G., Paz S., Gutiérrez A. J., Development stage and season influence in the metal content of small pelagic fish in the North-West Africa. *Chemosphere*, 2020, vol. 261, p. 127692.

19. Duarte A. M., Silva F., Mendes S., Pinto F. R., Barroso S., Silva E., Neves A., Sequeira V., Magalhães M. F., Rebelo R., Assis C., Vieira A. R., Gordo L. S., Gil M. M. Seasonal study of the nutritional composition of unexploited and low commercial value fish species from the Portuguese coast. *Food Science & Nutrition*, 2022, vol. 10, iss. 10, pp. 3368-3379.

20. Varol M., Sünbül M. R. Macroelements and toxic trace elements in muscle and liver of fish species from the largest three reservoirs in Turkey and human risk assessment based on the worst-case scenarios. *Environmental Research*, 2020, vol. 184, p. 109298.

21. Phoonaploy U., Tengjaroenkul B., Neeratanaphan L. Effects of electronic waste on cytogenetic and physiological changes in snakehead fish (*Channa striata*). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, p. 363.

22. Mingazova M. S., Miroshnikova E. P., Arinzhanov A. E., Kilyakova Yu. V. Koncentraciya himicheskikh elementov v myshechnoj tkani karpa pri vklyuchenii v racion biologicheskii aktivnyh veshchestv [The concentration of chemical elements in carp muscle tissue when biologically active substances are included in the diet]. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*, 2023, vol. 106, no. 4, pp. 18-29.

23. Shahjahan M., Taslima K., Rahman M. S., Al-Emran M., Alam S. I., Faggio C. Effects of heavy metals on fish physiology – A review. *Chemosphere*, 2022, vol. 300, p. 134519.

24. Napolitano G., Capriello T., Venditti P., Fasciolo G., La Pietra A., Trifuoggi M., Giarra A., Agnisola C., Ferrandino I. Aluminum induces a stress response in zebrafish gills by influencing metabolic parameters, morphology, and redox homeostasis. *Comparative Biochemistry and Physiology. Toxicology & Pharmacology*, 2023, vol. 271, p. 109633.

25. Zou H.-T., Xu K., Yang A., Hu X., Niu A., Li Q. Antimony accumulation in zebrafish (*Danio rerio*) and its effect on genotoxicity, histopathology, and ultrastructure. *Aquatic Toxicology*, 2022, vol. 252, p. 106297.

26. Kumar N., Bhushan S., Gupta S. K., Kumar P., Chandan N. K., Singh D. K., Kumar P. Metal determination and biochemical status of marine fishes facilitate the bio-monitoring of marine pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, vol. 170, p. 112682.

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 03.02.2025; принята к публикации 28.02.2025
The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 03.02.2025; accepted for publication 28.02.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Петровна Мирошникова – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой биотехнологии животного сырья и аквакультуры; Оренбургский государственный университет; elenaakva@rambler.ru

Марина Сергеевна Мингазова – ассистент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры; Оренбургский государственный университет; ms.mingazova@gmail.com

Elena P. Miroshnikova – Doctor of Biological Sciences, Professor; Head of the Department of Biotechnology of Foodstuffs from Animals and Aquaculture; Orenburg State University; elenaakva@rambler.ru.

Marina S. Mingazova – Lecturer of the Department of Biotechnology of Foodstuffs from Animals and Aquaculture; Orenburg State University; ms.mingazova@gmail.com

Азамат Ерсаинович Аринжанов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры; Оренбургский государственный университет; arin.azamat@mail.ru

Юлия Владимировна Килякова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры; Оренбургский государственный университет; fish-ka06@mail.ru

Azamat E. Arinzhanov – Candidate of Agricultural Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Biotechnology of Foodstuffs from Animals and Aquaculture; Orenburg State University; arin.azamat@mail.ru

Yuliya V. Kilyakova – Candidate of Biological Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Biotechnology of Foodstuffs from Animals and Aquaculture; Orenburg State University; fish-ka06@mail.ru

