

Действие нанокompозита марганца на организм карпа

М. С. МИНГАЗОВА¹, Ю. В. КИЛЯКОВА¹, Е. П. МИРОШНИКОВА¹, Д. И. БУЛАНИН^{1,2}, А. Е. АРИНЖАНОВ¹

¹Оренбургский государственный университет, пр-т Победы, 13, Оренбург, 460018, Российская Федерация

²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью оценки действия нанокompозита марганца, нанесенного на углеродный носитель (Mn-C), на рост, гематологические показатели и элементный статус мышечной ткани карпа для выявления безопасности и возможности использования в качестве кормовой добавки в аквакультуре. Объект исследования – годовики карпа. Для эксперимента методом пар-аналогов формировали 3 группы: контроль и 2 опытные по 10 голов в каждой. Длительность эксперимента 63 суток. Начиная с 8 суток в корм особей I и II опытных групп дополнительно к основному рациону вносили нанокompозит Mn-C в дозировках соответственно 0,2 ppm и 0,4 ppm. Прирост живой массы на 10,9 % ($p \leq 0,01$) от контроля наблюдали в группе с минимальной в опыте дозировкой Mn-C. Установлено снижение ряда морфологических параметров крови относительно контроля, в том числе лейкоцитов на 36,5 % ($p \leq 0,001$) во II группе и 39,9 % ($p \leq 0,001$) в I группе, эритроцитов – на 62,7 % ($p \leq 0,001$) в I группе и 47,8 % ($p \leq 0,01$) во II группе. При использовании нанокompозита Mn-C в дозировке 0,2 ppm зафиксировано повышение глюкозы, по сравнению с контролем, на 73,4 % ($p \leq 0,01$), альбумина – на 49,5 % ($p \leq 0,05$), общего белка – на 31,9 % ($p \leq 0,05$). Концентрация кальция в мышечной ткани карпа I опытной группы снижалась, по сравнению с контролем, на 25 % ($p \leq 0,05$), во II – на 34 % ($p \leq 0,01$), уровень натрия и фосфора в I группе возрастал на 38 % ($p \leq 0,05$) и 30 % ($p \leq 0,05$), во II группе зафиксировано значительное снижение содержания фосфора на 58 % ($p \leq 0,01$). В I и II группах заметно увеличивалась концентрация эссенциальных, условно-эссенциальных микроэлементов и токсических элементов. Нанокompозит марганца в изучаемых дозировках безопасен для карпа.

Ключевые слова: марганец, нанокompозиты, карп, аквакультура, элементный статус, кровь, живая масса

Сведения об авторах: М. С. Мингазова, кандидат биологических наук, ассистент (e-mail: ms.mingazova@gmail.com); Ю. В. Киякова, кандидат биологических наук, доцент; Е. П. Мирошникова, доктор биологических наук, зав. кафедрой; Д. И. Буланин, зав. лабораторией; А. Е. Аринжанов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Для цитирования: Действие нанокompозита марганца на организм карпа / М. С. Мингазова, Ю. В. Киякова, Е. П. Мирошникова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 29. № 8. С. 96–102. doi: 10.53859/02352451_2025_39_8_96

The effect of manganese nanocomposite on the carp organism

M.S. Mingazova¹, Yu.V. Kilyakova¹, E.P. Miroshnikova¹, D.I. Bulanin^{1,2}, A.E. Arinzhanov¹

¹Orenburg State University, pr-t Pobedy, 13, Orenburg, 460018, Russian Federation

²Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, ul. 9 Yanvarya, 29, Orenburg, Russian Federation

Abstract. The study aimed to evaluate the effect of a manganese nanocomposite deposited on a carbon carrier (Mn-C) on the growth, hematological parameters, and elemental status of carp muscle tissue to determine its safety and potential use as a feed additive in aquaculture. The study subjects were yearling carp. Three groups were formed for the experiment using the pair-analogue method: a control group and two experimental groups, each containing 10 animals. The experiment lasted 63 days. Starting from the 8th day, Mn-C nanocomposite was added to the feed of fish in experimental groups I and II in addition to the basic diet at dosages of 0.2 ppm and 0.4 ppm, respectively. A live weight gain of 10.9% ($p \leq 0.01$) relative to the control was observed in the group with the lowest Mn-C dosage in the experiment. A decrease in a number of morphological blood parameters was found compared to the control, including leukocytes by 36.5% ($p \leq 0.001$) in group II and 39.9% ($p \leq 0.001$) in group I, erythrocytes by 62.7% ($p \leq 0.001$) in group I and 47.8% ($p \leq 0.01$) in group II. When using the Mn-C nanocomposite at a dosage of 0.2 ppm, an increase in glucose, compared to the control, was recorded by 73.4% ($p \leq 0.01$), albumin – by 49.5% ($p \leq 0.05$), total protein – by 31.9% ($p \leq 0.05$). Compared to the control, calcium concentration in muscle tissue of carp in experimental group I decreased by 25% ($p \leq 0.05$), in group II by 34% ($p \leq 0.01$). Sodium and phosphorus levels in group I increased by 38% ($p \leq 0.05$) and 30% ($p \leq 0.05$), respectively. A significant decrease in phosphorus content by 58% ($p \leq 0.01$) was recorded in group II. The concentration of essential, conditionally essential microelements, and toxic elements significantly increased in groups I and II. The manganese nanocomposite in the studied doses is safe for carp.

Keywords: manganese; nanocomposites; carp; aquaculture; elemental status; blood; live weight.

Author Details: M. S. Mingazova, Cand. Sc. (Biol.), assist. (e-mail: ms.mingazova@gmail.com); Yu. V. Kilyakova, Cand. Sc. (Biol.), assoc. prof.; E. P. Miroshnikova, D. Sc. (Biol.), head of department; D. I. Bulanin, head of laboratory; A. E. Arinzhanov, Cand. Sc. (Agr.), assoc. prof.

For citation: Mingazova MS, Kilyakova YuV, Miroshnikova EP, et al. [The effect of manganese nanocomposite on the carp organism]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025;39(8):96–102. Russian. doi: 10.53859/02352451_2025_39_8_96

Нанотехнологии имеют множество жизненно важных биологических применений, поскольку живые системы зависят от большого количества таких наноразмерных объектов, как белки, ДНК, ферменты. Микроэлементы в рационе животных обычно используют в очень малых количествах, но такие проблемы, как низкая биодоступность, антагонизм и высокая скорость выведения из организма, ограничивают их эффективность. Нанотехнологии дают возможность решить эти проблемы, поскольку наночастицы отличаются от других форм минеральных элементов химическими и физическими свойствами. Им свойственны более высокая физическая активность и химическая нейтральность. Это повышает способность наночастиц усваиваться и использоваться в биологических системах [1].

Марганец (Mn) – один из микроэлементов, необходимых для правильного роста, развития и функционирования

живых организмов. Он служит кофактором и активатором таких ферментов, как галактозилтрансфераза, агматиназа, аргиназа, глутаминсинтетаза, пируваткарбоксилаза, супероксиддисмутаза и др., которые отвечают за правильное развитие костей, структуру клеток, метаболизм, митохондриальную антиоксидантную систему и гибель клеток [2].

Однако риск негативных последствий, как избытка, так и недостатка марганца в рационах животных достаточно высок. Например, при избытке он накапливается в основном в костной ткани, а также печени, почках, мозге, нарушая работу химических синапсов. В клетках марганец откладывается в митохондриях, затрудняя окислительное фосфорилирование и увеличивая выработку активных форм кислорода, что приводит к окислению белков и ДНК [3]. Кроме того, его высокое содержание в рационах влияет на биодоступность других минеральных элементов, нарушая баланс в органах иммунной системы. Недостаток

марганца в организме животных замедляет рост, снижает репродуктивную функцию, приводит к отклонению в развитии эмбрионов, скелета, функционировании ферментов и реакции иммунной системы [4].

В рационах гидробионтов в аквакультуре марганец еще не нашел широкого применения, хотя достаточно перспективен. На текущем этапе необходимо исследовать возможное последствие воздействия наночастиц Mn на организм гидробионтов, чтобы избежать токсичности и выбрать оптимальные дозировки для активации роста и иммунной защиты.

Цель исследования – оценить действие нанокompозита марганца, нанесенного на углеродный носитель (Mn-C), на рост, гематологические показатели и элементный статус мышечной ткани карпа для выявления безопасности и возможности использования в качестве кормовой добавки в аквакультуре.

Условия, материалы и методы. Объект исследования – годовики карпа (*Cyprinus carpio*). Эксперимент выполняли в 2024 г. на базе кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры Оренбургского государственного университета (г. Оренбург). Для исследования методом пар-аналогов формировали 3 группы (контроль (43,7±3,9) и 2 опытные (I – 44,3±4,5; II – 43,3±4,2)) по 10 шт. в каждой. Рыб содержали в условиях аквариумного стенда (V=300 л). Температура воды находилась в пределах 23±2 °C, pH – от 6,5 до 7,5.

Исследование длилось 63 суток, в том числе первые 7 суток – подготовительный период, в течение которого все рыбы потребляли основной рацион (ОР), состоявший из комбикорма КРК-110-1 (ОАО «Оренбургский комбикормовый завод», г. Оренбург, Россия). Он включает зерновое и белковое сырье, сырье животного происхождения, растительные масла и витаминно-минеральный комплекс. В состав комбикорма входит 25 % протеина, 3,5 % жира, 26 % углеводов и 9 % клетчатки.

Начиная с 8 суток и до конца эксперимента рыбе контрольной группы продолжали давать ОР, а в корм особей опытных групп дополнительно вносили нанокompозит Mn-C в разных дозировках: I группа – 0,2 ppm, II группа – 0,4 ppm. Кормление осуществляли 4 раза в светлое время суток через равные промежутки времени с использованием автоматических кормушек. Норма внесения корма составляла 5 % от массы тела рыб, расчет проводили еженедельно по результатам взвешивания.

В исследованиях использовали нанокompозит Mn-C (40...60 нм), произведенный с применением плазменно-дуговой технологии синтеза на углеродной наноструктурной матрице в Институте Теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск, Россия) [5]. Нанокompозит Mn-C вносили в корм путем напыления, с предварительным диспергированием в течение 30 минут в физиологическом растворе с помощью диспергатора ультразвукового УЗДН-2Т (NPP Academprigor, Russia).

На протяжении всего исследования еженедельно проводили индивидуальное взвешивание с целью контроля динамики живой массы. В конце эксперимента для изучения влияния нанокompозита Mn-C на организм рыб были отобраны кровь и мышечная ткань. Кровь для определения морфологических и биохимических показателей отбирали у 5 случайным образом выбранных особей, в вакуумные пробирки путем отсечения у них хвостового стебля. Для этого рыбу вынимали из воды и анестезировали раствором MS-222 в концентрации 100 мг/л. Срезали спинной и анальные плавники, заворачивали в марлевую салфетку, освободив хвостовой стебель. Скальпелем снимали чешую с хвостового стебля. Сначала сухим, а затем смоченным в спирте ватным тампоном снимали с поверхности тела

слизь. Ножницами отсекали хвостовой стебель по медиальной линии сзади анального плавника. Кровь собирали в культю хвоста, держа рыбу вверх головой и максимально приблизив вакуумные пробирки. Образцы крови для морфологических исследований отбирали в вакуумные пробирки с ЭДТА-КЗ, для биохимических исследований – в вакуумные пробирки с активатором свертывания. Мышечную ткань (мышцы туловища) отбирали с использованием стерильных инструментов с дальнейшим трехкратным измельчением.

Взвешивание проводили до кормления на весах ViBRO CJ-3200ER (Япония). Морфо-биохимические показатели крови определяли по стандартизированным методикам с использованием приборной базы Центра коллективного пользования биологических систем и агротехнологий РАН (<http://цклп-бст.рф>) на анализаторах «Mindray BC-2800 VET» («Mindray», Китай) и «DIRUI CS-T240» («DURIT Industrial Co., Ltd», Китай).

Анализ концентрации химических элементов в мышечной ткани выполняли в лаборатории АНО «Центр биотической медицины» г. Москва (лицензия МДКЗ 18097/9556) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Определяли концентрацию 25 макро- и микроэлементов.

Статистический анализ проводили с использованием программ «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США) и Microsoft Office Excel («Microsoft», США) методом ANOVA. Достоверность различий между сравниваемыми показателями определяли на основе критерия Стьюдента. Корреляционную связь рассчитывали по Пирсону.

Результаты и обсуждение. Повышение ростовых показателей от введения в рацион карпа нанокompозита Mn-C отмечали только при использовании дозировки 0,2 ppm (табл. 1).

Таблица 1. Темпы роста карпа, г

Неделя исследования	Контроль	Mn-C	
		0,2 ppm	0,4 ppm
Начало исследований	43,7±3,9	44,3±4,5	43,3±4,2
1	50,2±4,2	51,8±5,0	49,6±5,1
2	55,0±4,7	56,2±4,8	55,2±5,2
3	61,6±5,1	63,2±5,4	62,8±6,0
4	70,5±5,8	72,8±5,9	69,8±6,3
5	79,1±5,4	81,1±6,3	79,7±7,2
6	89,2±6,9	96,8±7,3*	89,7±7,5
7	98,6±7,1	108,0±7,9*	99,3±8,3
8	111,3±8,5	123,4±9,8**	110,7±9,0

*различия с контролем достоверны при $p \leq 0,05$; **при $p \leq 0,01$.

Прирост живой массы в I группе, на 6 неделе эксперимента повышался на 8,5 % ($p \leq 0,05$), на 7 неделе – на 9,5 % ($p \leq 0,05$), на 8 неделе – на 10,9 % ($p \leq 0,01$), относительно контрольных значений. При этом во II группе величина этого показателя оставалась на уровне контроля (см. рисунок).

При использовании нанокompозита Mn-C в дозе 0,2 ppm значительно изменялись рыболовно-биологические показатели. Так, абсолютный прирост повышался, по сравнению с контролем, на 6,9 %, среднесуточный – на 32 %. Однако коэффициент вариации средней массы был в пределах 7,66...8,12 % во всех группах (табл. 2).

Согласно результатам наших ранее проведенных исследований с использованием нанокompозита меди в дозировках 0,8 и 2 мг/кг корма изменения в ростовых показателях карпа отсутствовали [6]. Однако по другим данным медь в форме наночастиц совместно с витамином С стимулировала прирост живой массы у рыб [7]. При этом сведения о включении нанокompозита марганца в рационы

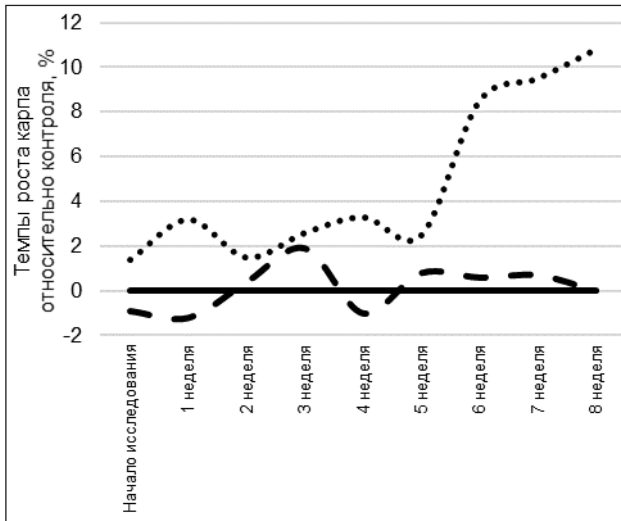


Рисунок. Темпы роста относительно контроля, %: — контроль, — Mn-C 0,2 ppm, — — — — — Mn-C 0,4 ppm. сельскохозяйственных животных ограничены, авторам удалось найти только данные о его использовании в форме наночастиц [8].

Таблица 2. Рыбоводно-биологические показатели карпа за период исследования (с 1 по 63 сутки)

Показатель	Контроль	Mn-C	
		0,2 ppm	0,4 ppm
Абсолютный прирост, г	67,3	78,7	67,7
Среднесуточный прирост, г	1,1	1,2	1,1
Относительный прирост, %	154	178	156
Коэффициент вариации, %	7,66	7,98	8,12
Выживаемость, %	100	100	100

Включение нанокompозита Mn-C в рацион карпа оказало значительное влияние на морфологические характеристики крови (табл. 3). В крови рыб, получавших его в качестве кормовой добавки в дозе 0,2 ppm, наблюдали достоверное снижение количества лейкоцитов относительно контроля на 39,9 % ($p \leq 0,001$), дозе 0,4 ppm – на 36,5 % ($p \leq 0,001$). Это с одной стороны указывает на отсутствие воспалительных процессов в организме [9], с другой – может быть показателем иммуносупрессии [10].

Количество эритроцитов снижалось относительно контроля в крови рыб I группы на 62,7 % ($p \leq 0,001$), II группы – на 47,8 % ($p \leq 0,01$), содержание гемоглобина – соответственно на 38,0 % ($p \leq 0,001$) и 27,9 % ($p \leq 0,001$),

Таблица 3. Морфо-биохимические показатели крови карпа

Показатель	Контроль	Mn-C	
		0,2 ppm	0,4 ppm
Лейкоциты, $10^9/\text{л}$	$116,00 \pm 5,13$	$69,70 \pm 5,13^{***}$	$73,70 \pm 5,51^{***}$
Эритроциты, $10^{12}/\text{л}$	$0,67 \pm 0,06$	$0,25 \pm 0,06^{***}$	$0,35 \pm 0,06^{**}$
Тромбоциты, $10^9/\text{л}$	$12,30 \pm 1,53$	$9,33 \pm 0,58^*$	$13,30 \pm 1,16$
Гемоглобин, г/л	$128,00 \pm 5,51$	$79,30 \pm 6,51^{***}$	$92,30 \pm 5,03^{***}$
Гематокрит, %	$13,10 \pm 1,40$	$5,03 \pm 0,65^{***}$	$6,80 \pm 0,60^{**}$
Глюкоза, ммоль/л	$3,20 \pm 0,44$	$5,55 \pm 0,41^{**}$	$3,24 \pm 0,17$
Общий белок, г/л	$22,90 \pm 2,12$	$30,20 \pm 2,08^*$	$32,80 \pm 2,62^{**}$
Альбумин, г/л	$10,70 \pm 1,53$	$16,00 \pm 2,00^*$	$13,30 \pm 1,16$
АЛТ, Ед/л	$55,40 \pm 7,47$	$41,80 \pm 5,29$	$38,60 \pm 8,27$
АСТ, Ед/л	$303,5 \pm 39,6$	$318,0 \pm 33,6$	$267,3 \pm 39,5$
Билирубин общий, мкмоль/л	$1,27 \pm 0,17$	$1,82 \pm 0,12^{**}$	$0,70 \pm 0,16^*$
Холестерин, ммоль/л	$1,30 \pm 0,23$	$3,01 \pm 0,19^{***}$	$2,59 \pm 0,27^{**}$
Триглицериды, ммоль/л	$1,59 \pm 0,45$	$2,19 \pm 0,34$	$1,84 \pm 0,25$
Мочевина, ммоль/л	$2,60 \pm 0,46$	$1,90 \pm 0,17$	$1,97 \pm 0,32$
Креатинин, мкмоль/л	$12,30 \pm 2,90$	$16,10 \pm 3,24$	$15,70 \pm 3,15$
Мочевая кислота, мкмоль/л	$20,50 \pm 0,90$	$18,50 \pm 1,29$	$22,50 \pm 1,42$
Железо, мкмоль/л	$3,47 \pm 0,40$	$2,10 \pm 0,30^{**}$	$2,67 \pm 0,42$
Кальций, ммоль/л	$2,03 \pm 0,28$	$2,73 \pm 0,27^*$	$2,06 \pm 0,34$
Фосфор, ммоль/л	$2,68 \pm 0,36$	$4,01 \pm 0,46^*$	$3,06 \pm 0,28$

*различия с контролем достоверны при $p \leq 0,05$; **при $p \leq 0,01$; ***при $p \leq 0,001$.

гематокрита – на 61,6 % ($p \leq 0,001$) и 48,1 % ($p \leq 0,01$). В опытах, проведенных на цыплятах-бройлерах Helbawi E.S. et al. (2024), наночастицы Mn в качестве кормовой добавки, как и в нашем исследовании, способствовали тому, что уровни эритроцитов, гематокрита были самыми низкими [4].

Количество тромбоцитов было ниже контроля на 24,1 % ($p \leq 0,05$) только в группе, получавшей минимальную в опыте дозировку нанокompозита Mn-C. В исследованиях, ранее проведенных на нильской тилпии и карпе, увеличение содержания эритроцитов и тромбоцитов, гемоглобина, гематокрита наблюдали при воздействии стресс-факторов, что свидетельствовало о активизации иммунной защиты организма [11, 12]. Таким образом, нанокompозит Mn-C в дозировках 0,2 и 0,4 ppm в рационе карпа не оказывал токсического воздействия.

Уровень глюкозы в крови рыб, получавших минимальную в опыте дозировку нанокompозита Mn-C превышал величину этого показателя в контроле на 73,4 % ($p \leq 0,01$). Содержание общего белка в крови рыб I и II групп также было больше, чем у особей в контрольной, соответственно на 31,9 % ($p \leq 0,05$) и 43,2 % ($p \leq 0,01$), что свидетельствует об активации белкового обмена [13]. Количество альбумина достоверно превышало величину этого показателя, по сравнению с контролем, на 49,5 % ($p \leq 0,05$) только в I группе. Такие изменения содержания глюкозы и альбумина в сыворотке крови карпа связаны с активным ростом и усилением обменных процессов в организме. Кроме того, большая концентрация глюкозы может быть обусловлена высоким уровнем стресса [14].

Количество билирубина в крови рыб I группы было больше, чем в контроле, на 43,3 % ($p \leq 0,01$), а во II группе – ниже на 44,9 % ($p \leq 0,05$), содержание холестерина – соответственно на 131,5 % ($p \leq 0,001$) и 99,2 % ($p \leq 0,01$), что может быть связано с активным ростом рыб [15, 16].

Из минеральных элементов только содержание железа снижалось в сыворотке крови рыб I группы на 39,5 % ($p \leq 0,01$). Концентрация кальция и фосфора в сыворотке крови рыб этой группы повысилась соответственно на 34,5 % ($p \leq 0,05$) и 49,6 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля. В работах других авторов [2, 4], проведенных на бройлерах, применение наночастиц Mn в рационах, как и в наших исследованиях, приводило к повышению содержания креатинина и фосфора в плазме крови.

Исследование элементного состава тканей рыб – актуальное направление изучения действия различных кормовых препаратов на организм гидробионтов, а также определения способности макро- и микроэлементов к аккумуляции [17]. Согласно элементному профилю (табл. 4), добавка из нанокompозита Mn-C приводила к изменению в концентрации химических элементов в мышечной ткани карпа. Концентрация кальция в I опытной группе снижалась, по сравнению с контролем, на 25 % ($p \leq 0,05$), во II – на 34 % ($p \leq 0,01$). В то же время уровень натрия и фосфора в I группе возрастал, относительно контроля, соответственно

Таблица 4. Элементный состав мышечной ткани карпа, мкг/кг

Наименование	Контроль	Mn-C	
		0,2 ppm	0,4 ppm
Макроэлементы			
Ca	896,6±60,5	676,5±66,6*	595,8±42,2**
K	1318,2±169,0	1159,4±99,8	1202,5±81,7
Mg	197,3±24,2	185,4±26,1	201,0±27,9
Na	213,8±40,0	294,4±27,7*	208,8±32,3
P	405,6±42,3	528,1±50,8*	168,8±39,5**
Микроэлементы			
Li	0,01±0,001	0,01±0,001	0,01±0,001
B	0,12±0,02	0,14±0,01	0,15±0,01*
Si	56,3±4,29	58,0±5,58	56,8±4,02
V	0,050±0,006	0,080±0,005**	0,070±0,004*
Cr	0,26±0,03	0,30±0,01	0,33±0,01*
Mn	0,32±0,05	0,30±0,04	0,38±0,06
Fe	15,20±2,22	15,90±3,21*	21,70±2,13
Co	0,010±0,002	0,010±0,001	0,010±0,001
Ni	0,13±0,02	0,16±0,01*	0,16±0,01*
Cu	1,27±0,17	1,51±0,12	1,87±0,15*
Zn	18,40±1,52	23,70±1,86*	19,50±1,98
Se	0,26±0,01	0,25±0,01	0,28±0,01*
I	0,08±0,01	0,09±0,01	0,11±0,01*
Токсические элементы			
Be	0,00040±	0,00060±	0,00020±
	0,00003	0,00005**	0,00002**
Al	4,67±0,50	6,37±0,36**	4,95±0,58
As	0,029±0,002	0,028±0,005	0,028±0,003
Cd	0,1200±	0,0030±	0,0090±
	0,0200	0,0004***	0,0008***
Sn	0,17±0,02	0,24±0,02**	0,48±0,07**
Hg	0,120±0,010	0,090±0,015*	0,170±0,015*
Pb	0,016±0,002	0,051±0,005***	0,043±0,004***

*различия с контролем достоверны при $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

на 38 % ($p \leq 0,05$) и 30 % ($p \leq 0,05$), во II группе зафиксировано значительное снижение содержания фосфора на 58 % ($p \leq 0,01$). Такие значения могут свидетельствовать о нарушении минерального обмена, что в процессе дальнейшего роста приводит к патологическим нарушениям в осевом скелете рыб [9]. Снижение уровня кальция и фосфора в мышечной ткани карпа может быть также связано с антагонизмом между марганцем и этими элементами [18].

У рыб, получавших Mn-C в качестве кормовой добавки в дозе 0,4 ppm, заметно увеличивалась концентрация эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов: меди – на 47 % ($p \leq 0,05$), железа – на 43 % ($p \leq 0,05$), ванадия – на 40 % ($p \leq 0,05$), йода – на 38 % ($p \leq 0,05$), хрома – на 27 % ($p \leq 0,05$), бериллия – на 25 % ($p \leq 0,05$), никеля – на 23 % ($p \leq 0,05$), селена – на 8 % ($p \leq 0,05$), по сравнению с контролем. В I группе зафиксировано только повышение содержания ванадия на 60 % ($p \leq 0,01$), никеля – на 23 % ($p \leq 0,05$) и цинка – на 29 % ($p \leq 0,05$).

Значительные различия между контролем и опытными группами выявлены по концентрации токсических элементов. При использовании в рационе карпа наноконкомпозита Mn-C в дозе 0,2 ppm содержание кадмия снижалось на 98 % ($p \leq 0,001$) и ртути – на 25 % ($p \leq 0,05$); алюминия, бериллия, олова и свинца – повышалась от 36 % ($p \leq 0,05$) до 219 % ($p \leq 0,001$). Рост дозировки до 0,4 ppm привел к увеличению содержания ртути, свинца и олова в мышечной ткани карпа – соответственно на 42 % ($p \leq 0,05$), 169 % ($p \leq 0,001$) и 182 % ($p \leq 0,01$), при снижении бериллия и кадмия – на 50 % ($p \leq 0,05$) и 93 % ($p \leq 0,001$) относительно контроля. При использовании дозы 0,2 ppm наблюдали повышение содержания свинца, олова и бериллия соответственно на 218 % ($p \leq 0,001$), 41 % ($p \leq 0,01$), 50 % ($p \leq 0,01$) и снижение концентрации ртути и кадмия на 25 % ($p \leq 0,05$) и 97,5 % ($p \leq 0,001$).

Независимо от дозировки наноконкомпозита Mn-C в мышцах рыб возрастала концентрация ряда токсических элементов, что может указывать на негативный эффект от его использования. При этом их содержание оставалось в пределах допустимых значений, а значит препарат в исследуемых дозировках безопасен и может использоваться в качестве кормовой добавки для карпа [19, 20].

Оценивая сильные положительные корреляционные связи ($r > 0,95$) между химическими элементами, входящими в состав мышечной ткани, и биохимическими показателями крови в I группе (табл. 5) можно отметить зависимость содержания алюминия от концентрации триглицеридов ($r = 1,00$), общего белка ($r = 0,99$) и альбуминов ($r = 0,95$). Похожие результаты были выявлены для олова, меди, йода и железа. Так, количество олова положительно коррелировало с концентрацией АЛТ ($r = 1,00$) и триглицеридов ($r = 1,00$); меди – с содержанием триглицеридов ($r = 1,00$) и общего белка (0,98); йода – с билирубином общим ($r = 1,00$) и креатинином ($r = 0,96$); железа – с глюкозой ($r = 1,00$) и АСТ ($r = 0,96$). Значительное влияние на концентрацию мочевой кислоты оказали бериллий ($r = 1,00$), хром ($r = 0,99$) и никель ($r = 0,97$); а на общий билирубин – кальций ($r = 1,00$) и фосфор ($r = 1,00$). Кроме того, уровень ртути положительно коррелировал с содержанием мочевины ($r = 1,00$), а кадмия – с креатинином ($r = 1,00$).

Значительная отрицательная корреляционная взаимосвязь ($r > -0,95$) в I группе установлена для концентрации АЛТ, холестерина и мочевой кислоты в сыворотке крови карпа по отношению к уровню химических элементов в мышечной ткани рыб. Так, АЛТ оказывала влияние на концентрацию свинца ($r = -1,00$), калия ($r = -1,00$), марганца ($r = -1,00$), цинка ($r = -0,99$), кремния ($r = -0,99$) и лития ($r = -0,97$); холестерин – на содержание ртути ($r = -1,00$), железа ($r = -1,00$), марганца ($r = -1,00$), кремния ($r = -0,98$) и лития ($r = -0,95$); мочевая кислота – на количество марганца ($r = -0,98$), селена ($r = -0,97$), кобальта ($r = -0,97$), ванадия ($r = -0,97$) и мышьяка ($r = -0,95$). На концентрацию глюкозы также оказывали воздействие содержание в мышцах йода ($r = -1,00$), кальция ($r = -0,99$) и кадмия ($r = -0,94$), на общий белок – количество натрия ($r = -0,99$) и лития ($r = -0,94$), а на триглицериды – количество натрия ($r = -1,00$), лития ($r = -0,99$) и кремния ($r = -0,97$). Кроме того, концентрация фосфора отрицательно коррелировала с глюкозой ($r = -0,99$), АСТ ($r = -0,98$) и альбумином ($r = -0,95$).

Наиболее значимые корреляционные связи ($r > \pm 0,95$) между биохимическими показателями и концентрацией химических элементов в тканях карпа были выявлены для АЛТ, глюкозы, альбумина и мочевой кислоты. Так, содержание мочевой кислоты отрицательно коррелировало с количеством свинца ($r = -1,00$), калия ($r = -1,00$), марганца ($r = -1,00$), кремния ($r = -1,00$), лития ($r = -0,98$) и цинка ($r = -0,98$), положительно – с концентрацией олова ($r = 1,00$). Содержание глюкозы положительно связано с количеством ванадия ($r = 0,99$), магния ($r = 0,96$), селена ($r = 0,95$) и кобальта ($r = 0,95$), отрицательно – с концентрацией бора ($r = -0,99$), хрома ($r = -0,98$), кадмия ($r = -0,96$) и никеля ($r = -0,95$).

Количество АЛТ в сыворотке крови карпа положительно коррелировало с концентрацией в мышцах никеля ($r = 0,99$), хрома ($r = 0,96$) и бора ($r = 0,95$), отрицательно – с содержанием мышьяка ($r = -1,00$), бериллия ($r = -1,00$), кобальта ($r = -0,99$), селена ($r = -0,99$) и магния ($r = -0,98$). При этом количество альбумина, в основном, положительно коррелировало с концентрацией в мышцах таких элементов, как бериллий ($r = 1,00$), мышьяк ($r = 0,99$), селен ($r = 0,98$), кобальт (0,98) и магний ($r = 0,97$), отрицательно – с никелем ($r = -0,98$) и ртутью ($r = -0,97$).

Содержание общего белка, которое во II группе возрастало (табл. 6), в основном, отрицательно коррелировало с

Таблица 5. Корреляционная взаимосвязь по Пирсону между биохимическими показателями крови и концентрацией химических элементов в мышечной ткани карпа при использовании нанокompозита Mn-C в дозировке 0,2 ppm

Элемент	Глюкоза	Общий белок	Альбумин	АЛТ	АСТ	Билирубин общий	Холестерин	Триглицериды	Мочевина	Креатинин	Мочевая кислота
Sn	0,37	0,85	0,74	1,00**	0,64	-0,43	1,00**	0,93*	0,91*	-0,08	0,36
Al	0,71	0,99**	0,95*	0,91*	0,89*	-0,75	0,88*	1,00**	0,68	-0,47	-0,05
As	0,48	-0,14	0,05	-0,66	0,18	-0,42	-0,70	-0,33	-0,90*	-0,72	-0,95**
Hg	-0,14	0,48	0,31	0,88*	0,18	0,07	0,91*	0,64	1,00	0,43	0,77
Pb	-0,37	-0,85	-0,74	-1,00**	-0,64	0,43	-1,00**	-0,94**	-0,91*	0,08	-0,35
Cd	-0,94*	-0,54	-0,69	0,01	-0,78	0,91*	0,07	-0,37	0,40	1,00**	0,93*
Be	0,38	-0,24	-0,06	-0,73	0,07	-0,32	-0,77*	-0,43	-0,94*	-0,64	-0,91*
K	-0,34	-0,84	-0,72	-1,00	-0,62	0,41	-1,00**	-0,93**	-0,92*	0,05	-0,38
Na	-0,69	-0,99**	-0,94*	-0,92*	-0,88*	0,74	-0,89*	-1,00**	-0,69	0,45	0,03
Ca	-0,99**	-0,87	-0,94*	-0,45	-0,98**	1,00**	-0,40	-0,75	-0,07	0,91**	0,66
Mg	0,60	0,00	0,18	-0,55	0,31	-0,54	-0,60	-0,19	-0,83	-0,81	-0,98**
P	-0,99**	-0,88*	-0,95**	-0,47	-0,98**	1,00**	-0,42	-0,77	-0,09	0,91**	0,64
Fe	1,00**	0,82	0,91	0,37	0,96*	-1,00**	0,31	0,69	-0,02	-0,95**	-0,72
Zn	-0,19	-0,74	-0,60	-0,99**	-0,49	0,26	-1,00**	-0,86*	-0,97*	-0,10	-0,52
Cu	0,69	0,98**	0,94*	0,92*	0,88*	-0,74	0,89*	1,00**	0,69	-0,44	-0,02
Se	0,56	-0,04	0,14	-0,58	0,27	-0,50	-0,63	-0,23	-0,85	-0,78	-0,97**
I	-1,00**	-0,80	-0,89*	-0,34	-0,95*	1,00**	-0,28	-0,66	0,06	0,96*	0,75
Mn	-0,31	-0,82	-0,70	-1,00**	-0,60	0,38	-1,00**	-0,91**	-0,93**	0,02	-0,41
Co	0,56	-0,05	0,14	-0,59	0,27	-0,50	-0,64	-0,24	-0,85	-0,78	-0,97**
Cr	-0,66	-0,09	-0,27	0,47	-0,39	0,61	0,53	0,11	0,78	0,85	0,99**
V	0,87*	0,41	0,57	-0,15	0,68	-0,84*	-0,21	0,23	-0,52	-0,98*	-0,97**
Si	-0,47	-0,90	-0,81*	-0,99**	-0,72	0,53	-0,98**	-0,97**	-0,86*	0,19	-0,25
B	-0,69	-0,12	-0,30	0,44	-0,42	0,64	0,50	0,07	0,76	0,87*	1,00**
Ni	-0,55	0,05	-0,13	0,59	-0,26	0,49	0,64	0,25	0,86*	0,77	0,97**
Li	-0,56	-0,94	-0,87	-0,97**	-0,79*	0,62	-0,95**	-0,99**	-0,80*	0,29	-0,14

*достоверно при $p \leq 0,05$; **при $p \leq 0,01$; ***при $p \leq 0,001$.

количеством фосфора ($r=-0,99$), кальция ($r=-0,98$) и йода ($r=-0,95$), положительно – с концентрацией железа ($r=0,96$). Содержание билирубина общего положительно коррелировало с концентрацией бора ($r=0,98$), хрома ($r=0,98$) и кадмия ($r=0,96$), отрицательно – с количеством ванадия ($r=-0,99$) и магния ($r=-0,96$). В то же время содержание холестерина положительно коррелировало с концентрацией ртути ($r=1,00$).

Наличие корреляционных связей в I группе между токсическими элементами и ключевыми биохимическими

показателями указывает на компенсаторную реакцию организма при включении в рацион карпа нанокompозита Mn-C и свидетельствует об активизации работы печени и почек [21].

При повышении дозировки нанокompозита Mn-C до 0,4 ppm установлено ослабление «стрессовых» связей, что объясняется тем, что марганец, как ключевой кофактор в высокой дозе более эффективно активирует ферменты, ответственные за синтез металлотионеинов, которые связывают и обезвреживают токсические элементы [1].

Таблица 6. Корреляционная взаимосвязь по Пирсону между биохимическими показателями крови и концентрацией химических элементов в мышечной ткани карпа при использовании нанокompозита Mn-C в дозировке 0,4 ppm

Элемент	Глюкоза	Общий белок	Альбумин	АЛТ	АСТ	Билирубин общий	Холестерин	Триглицериды	Мочевина	Креатинин	Мочевая кислота
Sn	-0,28	0,62	-0,73	0,68	0,95**	0,26	0,87	0,80	-0,17	0,82	1,00**
Al	0,13	0,88*	-0,40	0,34	0,74	-0,15	0,60	0,50	0,23	0,98*	0,93*
As	0,92*	0,20	0,99**	-1,00**	-0,86*	-0,91*	-0,94*	-0,97**	0,87*	-0,08	-0,61
Hg	-0,72	0,16	-0,97**	0,96**	0,98**	0,70	1,00	0,99**	-0,64	0,43	0,85
Pb	0,27	-0,63	0,73	-0,68	-0,94**	-0,25	-0,86	-0,80	0,17	-0,82	-1,00**
Cd	-0,96**	-0,79	-0,67	0,72	0,31	0,96*	0,49	0,59	-0,98**	-0,59	-0,05
Be	0,87*	0,10	1,00**	-1,00**	-0,91**	-0,86	-0,97**	-0,99**	0,81	-0,19	-0,69
K	0,30	-0,60	0,75	-0,70	-0,95**	-0,28	-0,88*	-0,82	0,20	-0,80	-1,00**
Na	-0,11	-0,87**	0,41	-0,36	-0,75	0,13	-0,61	-0,51	-0,22	-0,98*	-0,94*
Ca	-0,72	-0,98**	-0,26	0,32	-0,16	0,73	0,03	0,15	-0,79	-0,89*	-0,50
Mg	0,96**	0,33	0,97**	-0,98**	-0,78	-0,96*	-0,88*	-0,93**	0,93**	0,05	-0,50
P	-0,70	-0,99**	-0,24	0,30	-0,18	0,72	0,01	0,13	-0,77	-0,90*	-0,52
Fe	0,78	0,96**	0,35	-0,41	0,06	-0,79	-0,13	-0,24	0,84	0,85*	0,42
Zn	0,45	-0,47	0,84*	-0,80	-0,99**	-0,42	-0,94**	-0,90*	0,35	-0,70	-0,98**
Cu	0,10	0,87*	-0,42	0,36	0,75	-0,13	0,62	0,52	0,21	0,97*	0,94*
Se	0,95**	0,30	0,98**	-0,99**	-0,80	-0,94**	-0,90*	-0,95**	0,91**	0,01	-0,53
I	-0,80	-0,95**	-0,38	0,44	-0,03	0,81	0,16	0,27	-0,86	-0,83*	-0,39
Mn	0,33	-0,58	0,77	-0,72	-0,96*	-0,31	-0,89*	-0,83	0,23	-0,79	-1,00**
Co	0,95*	0,29	0,98**	-0,99**	-0,81	-0,94*	-0,90*	-0,95*	0,91*	0,01	-0,54
Cr	-0,98*	-0,41	-0,94**	0,96**	0,72	0,98**	0,84	0,90*	-0,96**	-0,14	0,42
V	0,99**	0,69	0,77	-0,81	-0,45	-0,99**	-0,61	-0,70	1,00**	0,46	-0,10
Si	0,16	-0,71	0,65	-0,60	-0,90*	-0,14	-0,80	-0,73	0,06	-0,88*	-1,00**
B	-0,99**	-0,44	-0,93**	0,95**	0,70	0,98**	0,82	0,88*	-0,97*	-0,17	0,39
Ni	-0,95*	-0,28	-0,98**	0,99**	0,81	0,94*	0,91*	0,95*	-0,91*	0,00	0,54
Li	0,06	-0,78	0,56	-0,51	-0,85*	-0,04	-0,74	-0,65	-0,05	-0,93*	-0,98*

*достоверно при $p \leq 0,05$; **при $p \leq 0,01$.

Выводы. Включение в рацион карпа нанокompозита Mn-C в дозировках 0,2 ppm и 0,4 ppm повлияло на прирост живой массы карпа. В группе с минимальной дозировкой Mn-C он был заметно выше, чем в контроле.

Применение препарата в обеих дозах способствовало снижению ряда морфологических параметров крови, в том числе лейкоцитов на 36,5...39,9 %. Наименьшая дозировка препарата (0,2 ppm) обеспечивала повышение содержания глюкозы на 73,4 % ($p \leq 0,01$), альбумина – на 49,5 % ($p \leq 0,05$) и общего белка – на 31,9 % ($p \leq 0,05$), относительно контроля.

Элементный профиль подопытных карпов выглядел следующим образом: при дозировке нанокompозита Mn-C 0,2 ppm – повышение в мышечной ткани концентрации натрия, фосфора, ванадия, никеля, цинка, бериллия, алюминия, олова, свинца и снижение содержания кальция, кадмия и ртути; при дозировке 0,4 ppm – повышение количества бора, ванадия, хрома, железа, никеля, меди, селена, йода, ртути, олова, свинца и снижение содержания кальция, фосфора, бериллия и кадмия.

Прослеживалась взаимосвязь между накоплением химических элементов в мышечной ткани карпа и биохимическими показателями сыворотки крови. В I группе установлена зависимость между снижением кадмия и кальция в мышечной ткани рыб и повышением глюкозы, общего

белка и альбумина. Во II группе изменение белкового и липидного профиля было связано с увеличением содержания эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов.

Несмотря на положительное влияние введения в рацион годовиков карпа нанокompозита Mn-C в дозировках 0,2 и 0,4 ppm на продуктивность и обмен веществ у рыбы, величины ряда показателей (количество лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов, уровень глюкозы) свидетельствуют о высоком уровне стресса в опытных группах. В целом, нанокompозит марганца в дозировках 0,2 и 0,4 ppm безопасен для карпа и может быть использован в качестве кормовой добавки в аквакультуре.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-550.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Эксперименты с участием рыб проводились в соответствии с требованиями Этического комитета ОГУ и были одобрены на заседании комиссии по контролю за содержанием и использованием животных (протокол № 1 от 17.01.2024 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Hassan S., Hassan F. U., Rehman M. S. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: Potential applications and future prospects // *Biol Trace Elem Res*. 2020. Vol. 195. No. 2. P. 591–612. doi: 10.1007/s12011-019-01862-9.
- Effects of feeding methionine hydroxyl analogue chelated zinc, copper, and manganese on growth performance, nutrient digestibility, mineral excretion and welfare conditions of broiler chickens: Part 1: Performance aspects / H. D. Nguyen, A. F. Moss, F. Yan, et al. // *Animals (Basel)*. 2025. Vol. 15. No. 3. Article 421. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/15/3/421> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.3390/ani15030421.
- The effect of manganese nanoparticles on apoptosis and on redox and immune status in the tissues of young turkeys / J. Jankowski, K. Ognik, A. Stępniewska, et al. // *PLoS One*. 2018. Vol. 13. No. 7. Article 0201487. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0201487> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1371/journal.pone.0201487.
- Impacts of biosynthesized manganese nanoparticles on antioxidant capacity, hematological parameters, and antioxidant protein docking in broilers / E. S. Helbawi, S. A. Abd El-Latif, M. A. Toson, et al. // *ACS Omega*. 2024. Vol. 9. No. 8. P. 9396–9409. doi: 10.1021/acsomega.3c08775.
- Pt/CeO₂ and Pt/CeSnO_x catalysts for low-temperature CO oxidation prepared by plasma-arc technique / T. Y. Kardash, E. A. Derevyannikova, E. M. Slavinskaya, et al. // *Front Chem*. 2019. Vol. 7. Article 114. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2019.00114/full> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.3389/fchem.2019.00114.
- Влияние нанокompозита Cu-C на гематологические показатели карпа / Е. П. Мирошникова, А. Е. Аринжанов, Ю. В. Кулякова и др. // *Вестник КрасГАУ*. 2025. № 3. С. 140–148. doi: 10.36718/1819-4036-2025-3-140-148.
- Modulatory effect of dietary copper nanoparticles and vitamin C supplementations on growth performance, hematological and immune parameters, oxidative status, histology, and disease resistance against *Yersinia ruckeri* in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / N. M. Delavari, A. Gharaei, H. J. Mirdar, et al. // *Fish Physiol Biochem*. 2022. Vol. 48. No. 1. P. 33–51. doi: 10.1007/s10695-021-01036-2.
- Manganese nanoparticles control the gene regulations against multiple stresses in *Pangasianodon hypophthalmus* / N. Kumar, S. T. Thorat, A. K. Singh, et al. // *Sciences Reported*. 2023. Vol. 13. No. 1. Article 15900. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-43084-z> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1038/s41598-023-43084-z.
- Investigations of hemato-biochemical and histopathological parameters, and growth performance of walking catfish (*Catfish batrachus*) exposed to PET and LDPE microplastics / K. Fatema, T. I. Auditi, S. Biswas, et al. // *Environ Toxicol Pharmacol*. 2023. Vol. 102. Article 104250. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1382668923001928?via%3Dihub> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1016/j.etap.2023.104250.
- Влияние комбинированного стресса на гематологические показатели карпа (*Cyprinus carpio*) / Т. Г. Крылова, Д. И. Сафронов, Г. С. Крылов и др. // *Ученые записки учреждения образования УО ВГАВМ*. 2021. Т. 57. № 4. С. 78–82. doi: 10.52368/2078-0109-2021-57-4-78-82
- Nabi N., Ahmed I., Wani G. B. Hematological and serum biochemical reference intervals of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* cultured in Himalayan aquaculture: Morphology, morphometrics and quantification of peripheral blood cells // *Saudi J Biol Sci*. 2022. Vol. 29. No. 4. P. 2942–2957. doi: 10.1016/j.sjbs.2022.01.019.
- Response and recovery of Nile tilapia exposed to diesel oil - Behavioral, hemato-biochemical and morphological changes of erythrocytes / A. M. Hasan, S. R. Ferdous, S. M. Islam, et al. // *Toxicol Rep*. 2022. Vol. 9. P. 549–555. doi: 10.1016/j.toxrep.2022.03.039.
- Evaluation of lead exposure effects on tissue accumulation, behavior, morphological and hemato-biochemical changes in common carp, *Cyprinus carpio* / S. S. Habib, S. Maqaddas, F. Fazio, et al. // *J Trace Elem Med Biol*. 2024. Vol. 86. Article 127523. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0946672X24001433?via%3Dihub> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1016/j.jtemb.2024.127523.
- Биологическое действие нанокompозита Zn-C на организм рыб / Ю. В. Кулякова, Е. П. Мирошникова, А. Е. Аринжанов и др. // *Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2024. № 5 (77). С. 249–255. doi: 10.32786/2071-9485-2024-05-27.
- Intra-variability of some biochemical parameters and serum electrolytes in rainbow trout (Walbaum, 1792) bred using a flow-through system / F. Fazio, C. Saoca, G. Capillo, et al. // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. No. 2. Article 06361. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021004667?via%3Dihub> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06361.
- Abbaszadeh M., Sayadi M. H., Kharkan J. Impact of polyvinyl chloride microplastic and paraquat herbicide on the blood cells, biochemical parameters, liver enzymes and morphological changes of aqueduct fish // *Chemosphere*. 2024. Vol. 362. Article 142643. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524015376?via%3Dihub> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1016/j.

chemosphere.2024.142643.

17. The essential metals for humans: A brief overview / M. A. Zoroddu, J. Aaseth, G. Crisponi, et al. // *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2019. Vol. 195. P. 120–129. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2019.03.013.

18. Роль марганца в обмене кальция на уровне энтеральной и внутренней среды организма / Д. А. Ксенофонов, О. А. Войнова, А. А. Ксенофопова и др. // *Тимирязевский биологический журнал*. 2023. № 2. С. 59–68. doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-59-68.

19. Биологическое действие ультрадисперсных частиц, SiO₂, пробиотического препарата Бифидобиом и комплекса микроэлементов на организм карпа / М. С. Аринжанова, Е. П. Мирошникова, А. Е. Аринжанов и др. // *Животноводство и кормопроизводство*. 2023. Т. 106. № 1. С. 48–66. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-48.

20. Effects of heavy metals on fish physiology – A review / M. Shahjahan, K. Taslima, M. S. Rahman, et al. // *Chemosphere*. 2022. Vol. 300. Article 134519. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522010128?via%3Dihub> (дата обращения: 07.06.2025). doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134519.

21. Comparison of modes of action between fish, cell and mitochondrial toxicity based on toxicity correlation, excess toxicity and QSAR for class-based compounds / S. Wang, X. Zhang, B. Gui, et al. // *Toxicology*. 2022. Vol. 470. Article 153155. doi: 10.1016/j.tox.2022.153155.

References

1. Hassan S, Hassan FU, Rehman MS. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: Potential applications and future prospects. *Biol Trace Elem Res*. 2020;195(2):591-612. doi: 10.1007/s12011-019-01862-9.

2. Nguyen HD, Moss AF, Yan F, et al. Effects of feeding methionine hydroxyl analogue chelated zinc, copper, and manganese on growth performance, nutrient digestibility, mineral excretion and welfare conditions of broiler chickens: Part 1: Performance aspects. *Animals (Basel)* [Internet]. 2025 [cited 2025 Jun 7];15(3): Article 421. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/15/3/421>. doi: 10.3390/ani15030421.

3. Jankowski J, Ognik K, Stepniowska A, et al. The effect of manganese nanoparticles on apoptosis and on redox and immune status in the tissues of young turkeys. *PLoS One* [Internet]. 2018 [cited 2025 Jun 7];13(7): Article 0201487. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0201487>. doi: 10.1371/journal.pone.0201487.

4. Helbawi ES, Abd El-Latif SA, Toson MA, et al. Impacts of biosynthesized manganese nanoparticles on antioxidant capacity, hematological parameters, and antioxidant protein docking in broilers. *ACS Omega*. 2024;9(8):9396-409. doi: 10.1021/acsomega.3c08775.

5. Kardash TY, Derevyannikova EA, Slavinskaya EM, et al. Pt/CeO₂ and Pt/CeSnO_x catalysts for low-temperature CO oxidation prepared by plasma-arc technique. *Front Chem* [Internet]. 2019 [cited 2025 Jun 7];7: Article 114. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2019.00114/full>. doi: 10.3389/fchem.2019.00114.

6. Miroshnikova EP, Arinzhonov AE, Kilyakova YuV, et al. [Effect of Cu-C nanocomposite on hematological parameters of carp]. *Vestnik KrasGAU*. 2025;(3):140-8. Russian. doi: 10.36718/1819-4036-2025-3-140-148.

7. Delavari NM, Gharaei A, Mirdar HJ, et al. Modulatory effect of dietary copper nanoparticles and vitamin C supplementations on growth performance, hematological and immune parameters, oxidative status, histology, and disease resistance against *Yersinia ruckeri* in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fish Physiol Biochem*. 2022;48(1):33-51. doi: 10.1007/s10695-021-01036-2.

8. Kumar N, Thorat ST, Singh AK, et al. Manganese nanoparticles control the gene regulations against multiple stresses in *Pangasianodon hypophthalmus*. *Sciences Reported* [Internet]. 2023 [cited 2025 Jun 7];13(1): Article 15900. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-43084-z>. doi: 10.1038/s41598-023-43084-z.

9. Fatema K, Auditi TI, Biswas S, et al. Investigations of hemato-biochemical and histopathological parameters, and growth performance of walking catfish (*Clarias batrachus*) exposed to PET and LDPE microplastics. *Environ Toxicol Pharmacol* [Internet]. 2023 [cited 2025 Jun 7];102: Article 104250. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1382668923001928?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.etap.2023.104250.

10. Krylova TG, Safronov DI, Krylov GS, et al. [Effect of combined stress on hematological parameters of carp (*Cyprinus carpio*)]. *Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya UO VGAVM*. 2021;57(4):78-82. Russian. doi: 10.52368/2078-0109-2021-57-4-78-82.

11. Nabi N, Ahmed I, Wani GB. Hematological and serum biochemical reference intervals of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* cultured in Himalayan aquaculture: Morphology, morphometrics and quantification of peripheral blood cell. *Saudi J Biol Sci*. 2022;29(4):2942-57. doi: 10.1016/j.sjbs.2022.01.019.

12. Hasan AM, Ferdous SR, Islam SM, et al. Response and recovery of Nile tilapia exposed to diesel oil - Behavioral, hemato-biochemical and morphological changes of erythrocytes. *Toxicol Rep*. 2022;9:549-55. doi: 10.1016/j.toxrep.2022.03.039.

13. Habib SS, Maqaddas S, Fazio F, et al. Evaluation of lead exposure effects on tissue accumulation, behavior, morphological and hemato-biochemical changes in common carp, *Cyprinus carpio*. *J Trace Elem Med Biol* [Internet]. 2024 [cited 2025 Jun 7];86: Article 127523. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0946672X24001433?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.jtemb.2024.127523.

14. Kilyakova YuV, Miroshnikova EP, Arinzhonov AE, et al. [Biological effect of Zn-C nanocomposite of the fish organism]. *Izvestiya Nizhnevolszhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2024;(5):249-55. Russian. doi: 10.32786/2071-9485-2024-05-27.

15. Fazio F, Saoca C, Capillo G, et al. Intra-variability of some biochemical parameters and serum electrolytes in rainbow trout (*Walbaum*, 1792) bred using a flow-through system. *Heliyon* [Internet]. 2021 [cited 2025 Jun 7];7(2): Article 06361. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021004667?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06361.

16. Abbaszadeh M, Sayadi MH, Kharkan J. Impact of polyvinyl chloride microplastic and paraquat herbicide on the blood cells, biochemical parameters, liver enzymes and morphological changes of aqueduct fish. *Chemosphere* [Internet]. 2024 [cited 2025 Jun 7];362: Article 142643. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524015376?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142643.

17. Zoroddu MA, Aaseth J, Crisponi G, et al. The essential metals for humans: A brief overview. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2019;195:120-9. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2019.03.013.

18. Ksenofontov DA, Voinova OA, Ksenofontova AA, et al. [Role of manganese in calcium metabolism at the level of the enteral and internal environment of the body]. *Timiryazevskii biologicheskii zhurnal*. 2023;(2):59-68. Russian. doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-59-68.

19. Arinzhonova MS, Miroshnikova EP, Arinzhonov AE, et al. [Biological effect of ultrafine particles of SiO₂, probiotic preparation Bifidobiom and a complex of microelements on the body of carp]. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*. 2023;106(1):48-66. Russian. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-48.

20. Shahjahan M, Taslima K, Rahman MS, et al. Effects of heavy metals on fish physiology – A review. *Chemosphere* [Internet]. 2022 [cited 2025 Jun 7];300: Article 134519. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522010128?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134519.

21. Wang S, Zhang X, Gui B, et al. Comparison of modes of action between fish, cell and mitochondrial toxicity based on toxicity correlation, excess toxicity and QSAR for class-based compounds. *Toxicology*. 2022;470: Article 153155. doi: 10.1016/j.tox.2022.153155.

Поступила в редакцию 10.07.2025 После доработки 07.08.2025 Принята к публикации 27.08.2025