

На правах рукописи



БУЛАНИН ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ

**Эколого-биологические особенности адаптации пресноводной
экосистемы к поступлению наночастиц металлов**

1.5.15. Экология (биологические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Оренбург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко».

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Мирошникова Елена Петровна

Официальные оппоненты: **Волкова Ирина Владимировна**
доктор биологических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», кафедра гидробиологии и общей экологии, заведующая;

Медянкина Мария Владимировна
кандидат биологических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», кафедра экологии и природопользования, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина».

Защита состоится 16 декабря 2026 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.352.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13, аудитория 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13 и на сайте <http://www.osu.ru/doc/5595/asp/265>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аринжанов
Азамат Ерсаинович

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсификация производства в аквакультуре неизбежно влечет за собой риски экологического характера, включая загрязнение водоемов метаболитами гидробионтов и остатками кормов, содержащими избыточные концентрации металлов, антибиотиков и других веществ (Boyd et al., 2022). Опосредованное влияние кормов и метаболитов гидробионтов на экосистемы водоемов сопровождается каскадом изменений, затрагивающих водных обитателей и микрофлору. Понимание этих процессов имеет важное значение как при оценке угроз и разработке природоохранных мероприятий, так и для совершенствования технологий производства в аквакультуре. Методики экологической экспертизы необходимо распространять и на вновь разрабатываемые решения, к числу которых относится применение в кормлении рыбы препаратов наночастиц металлов-микроэлементов (НЧ) (Noureen et al., 2022; Мингазова М.С. и др., 2023), в том числе нанокомпозитов – двух- и многокомпонентных препаратов НЧ. Благодаря малому размеру частиц (1-100 нм) и высокой удельной площади поверхности, нанокомпозиты обладают повышенной реакционной способностью и биодоступностью по сравнению с традиционными солями металлов. Это дает возможность использовать значительно меньшие дозировки микроэлементов, минимизируя их вымывание в окружающую среду и снижая риск экотоксикации водоемов. Между тем применение нанокомпозитов требует всесторонней оценки их влияния как на объект аквакультуры, так и водные экосистемы, в том числе на возможность их накопления и выведения, на клеточные структуры. Следует с осторожностью использовать нанокомпозиты в связи с их возможной токсичностью, что в полной мере относится к практике применения НЧ таких тяжелых металлов как Zn, Cu, Ag другие (Мирошникова Е.П. и др., 2025; Mamidi et al., 2025).

В частности, препараты НЧ меди являются перспективными, но малоизученным кормовым добавками для объектов аквакультуры. Медь как микроэлемент оказывает важное действие на рост и развитие гидробионтов, участвуя в ряде биологических процессов – в синтезе гемоглобина, формировании костей, липидном обмене. В то же время НЧ меди в силу антибиотического действия способны подавлять развитие микроорганизмов, оказывать депрессивное действие на водные организмы. В литературе представлены результаты исследований, указывающих на действие НЧ меди со снижением поедаемости кормов, развитием анемии и повышением смертности гидробионтов (Ma et al., 2023; Wang et al., 2025).

Важным, но недостаточно изученным аспектом применения нанокомпозитов в аквакультуре остаётся их воздействие на кишечный микробиом рыб.

Степень разработанности темы. Экологические последствия поступления инженерных наночастиц в пресноводные экосистемы остаются наименее изученным звеном нанотоксикологии: закономерности поведения и трансформации наноматериалов в водной среде описаны достаточно полно (Gambardella C., Pinsino A., 2022; Dube E., Okuthe G.E., 2023; Irumva O. et al., 2025), тогда как отклик экосистемы в целом, с учетом трофических связей продуцентов, консументов и микробного звена исследован фрагментарно (Соседова Л.М. и др., 2021; Гусев А.А. и др., 2021). Это сдерживает как экологическое нормирование, поскольку действующие рыбохозяйственные нормативы ПДК разрабатывались без учета наноразмерных форм металлов (Моисеенко, 2019; Перечень рыбохозяйственных ПДК и ОБУВ, 1999), так и обоснованное внедрение новых кормовых препаратов в аквакультуре. При этом факты, накопленные наукой по проблеме, достаточно противоречивы, особенно в

части наночастиц металлов-микроэлементов, выступающих одновременно эссенциальными нутриентами и потенциальными экотоксикантами.

В частности, для наноразмерных форм меди показано выраженное прооксидантное действие на рыб (Noureen A. et al., 2022; Sielska A. et al., 2024; Badran S.R., Hamed A., 2024), угнетение высших водных растений (Nekrasova G.F. et al., 2011; Vidaković-Cifrek Ž. et al., 2015; Zhao Z. et al., 2015) и накопление в тканях донных моллюсков (Ramskov T. et al., 2014). Для марганца установлена более высокая биологическая активность наноразмерной фракции в сравнении с ионной формой (Kumar N. et al., 2023), однако оптимальные уровни того же элемента, напротив, укрепляют антиоксидантную защиту гидробионтов (Liu Y. et al., 2024), а устойчивость к хронической экспозиции определяется жизненной стратегией вида (Uusi-Heikkilä S. et al., 2024). Столь же двойственно оценивается магний, являясь центральным атомом хлорофилла и стимулятором накопления биомассы фотоавтотрофов (Salman J.M. et al., 2023), в наноразмерной форме он может нарушать энергетический метаболизм клеток рыб (Zhang L. et al., 2026).

Разнонаправлены в том числе реакции таксонов микробиома от подавления резидентных таксонов и реструктуризации сообщества (Wojciechowska O. et al., 2023) до увеличения численности отдельных групп бактерий при поступлении ультрадисперсных частиц металлов (Аринжанов А.Е., 2025).

Существенно и то, что подавляющее большинство приведенных результатов получено при прямом внесении наночастиц в водную среду в сублетальных концентрациях и на отдельных тест-объектах, тогда как в практике аквакультуры поступление наноразмерных микроэлементов осуществляется через корм и реализуется в существенно меньших дозировках (Кожевникова Е.А. и др., 2017; Мингазова М.С. и др., 2023; Мирошникова Е.П. и др., 2025).

Поэтому особый интерес вызывают исследования, направленные на изучение адаптации организмов пресноводной экосистемы к опосредованному поступлению углеродных нанокompозитов магния, марганца и меди, для разработки новых подходов к экологической экспертизе кормовых препаратов и нормированию наноразмерных форм металлов в водных объектах рыбохозяйственного значения.

Цель и задачи исследования. Целью работы, которая выполнялась в соответствии с госбюджетной НИР ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» (госрегистрация №122101100049-1), при финансовой поддержке гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№ 075-15-2024-550) являлось изучение адаптации живых организмов и структурно-функциональной организации пресноводной экосистемы к поступлению наночастиц магния, марганца и меди.

При этом решались следующие задачи:

1. Дать оценку таксономическому составу микрофлоры кишечника *Cyprinus carpio* при поступлении с кормом нанокompозитов магния, марганца и меди в различных дозировках.

2. Изучить влияние абиотических факторов технологических процессов рыбного хозяйства – препаратов углеродных нанокompозитов магния, марганца и меди в различных дозировках – на биосистему «микрофлора кишечника - организм хозяина (каrp)».

3. Изучить особенности адаптации организмов пресноводной экосистемы *Lemna minor*, *Planorbis planorbis*, *Daphnia magna* и *Cyprinus carpio* в условиях поступления наночастиц меди и магния с кормом в организм карпа.

4. Изучить действие исследуемых факторов на фотосинтезирующие процессы в экосистеме на модели ряски малой (*Lemna minor*).

Научная новизна. Впервые в эксперименте дана комплексная оценка изменений в биосистеме «микрофлора кишечника - организм хозяина (каarp)» на фоне поступления наноконпозитов магния, марганца и меди в различных дозировках.

Получены новые для науки данные о таксономическом составе микрофлоры кишечника *Cyprinus carpio* при поступлении с кормом наноконпозитов магния, марганца и меди.

Впервые в эксперименте описан таксономический состав и выявлены общие закономерности в формировании микрофлоры кишечника карпа на фоне скармливания углеродных наноконпозитов Mg-C, Mn-C и Cu-C. Установлен факт повышения индексов разнообразия Шеннона, Симпсона при нагрузке наноконпозитом Cu-C и дозозависимой замены представителей нормальной кишечной микробиоты рыб (облигатно анаэробные грамотрейцательные бактерии – род *Cetobacterium*, семейство *Fusobacteriaceae*, класс *Fusobacteriia*, фила *Fusobacteriota*; грамположительные бактерии – род *Culicoidibacter*, семейство *Erysipelotrichaceae*, класс *Bacilli*, фила *Bacillota*) на спирохет (род *Brevinema*, семейство *Brevinemataceae*, класс *Brevinematia*, фила *Spirochaetota*) и актиномицеты (род *Aurantimicrobium*, семейство *Microbacteriaceae*, класс *Actinobacteria*, фила *Actinomycetota*), а также факультативно анаэробные грамотрейцательные палочки (род *Polynucleobacter*, семейство *Burkholderiaceae*, и род *Shewanella*, семейство *Shewanellaceae*, класс *Gammaproteobacteria*, фила *Pseudomonadota*).

Впервые, изучено опосредованное действие наночастиц металлов-микроэлементов, как компонентов корма карпа, через экосистему «микрофлора кишечника - организм хозяина (*Cyprinus carpio*)» на фотосинтезирующие процессы ряски малой (*Lemna minor*) в экосистеме. Описано деструктивное воздействие наноконпозитов Cu-C с развитием хлороза и уменьшение размера лопастей, что имеет место при снижении концентрации хлорофилла А и Б, а также каротиноидов.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке и апробации рабочей гипотезы, описывающей взаимосвязанные изменения в организмах пресноводной экосистемы *Lemna minor*, *Planorbis planorbis* и *Cyprinus carpio* в условиях поступления наночастиц частиц меди и магния с кормом в организм карпа.

Теоретически обосновано и описано в эксперименте действие компонентов корма карпа – наночастиц металлов-микроэлементов на обмен минеральных веществ организмов водного биоценоза - *Planorbis planorbis* и *Cyprinus carpio*.

Практическая значимость работы заключается в получении количественных характеристик отклика пресноводной экосистемы на поступление углеродных наноконпозитов магния, марганца и меди с кормом карпа, которые могут быть использованы при разработке и корректировке экологических регламентов, программ мониторинга, направленных на рациональное управление и совершенствование методов оценки состояния водных ресурсов применяемых в аквакультуре.

Методология и методы исследования. В процессе эксперимента применялся междисциплинарный подход стандартных экологических, зоотехнических и микробиологических методов с использованием сертифицированного оборудования материально-технической базы кафедры БЖСиА ОГУ, ЦКП ФНЦ БСТ РАН и ЦКП

«Персистенция микроорганизмов» УрО РАН. Статистическая обработка проводилась с помощью программных пакетов «Excel» («Microsoft», США) и «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США).

Основные положения, выносимые на защиту:

– включение в рацион карпа углеродных нанокompозитов магния, марганца и меди приводит к качественному и количественному изменению таксономического состава микробиома кишечника рыб, а также к изменению показателей альфа- и бета-разнообразия микробиоты, выраженность которых зависит от природы металла и дозировки препарата;

– поступление с кормом углеродных нанокompозитов Mg-C, Mn-C и Cu-C в дозировке 0,2 мг/кг корма позволяет повысить интенсивность роста карпа при сохранении жизнеспособности рыбы и отсутствии признаков гепатотоксичности, что сопровождается перестройкой гематологического и биохимического профиля крови;

– углеродные нанокompозиты магния, марганца и меди являются абиотическим фактором, изменяющим элементный статус карпа, что выражается в снижении обменного пула макроэлементов, устойчивом снижении содержания токсических элементов в мышечной ткани и сохранении гомеостатической регуляции уровня вносимых металлов;

– состав микробиома кишечника селективно связан с элементным статусом рыб, что выражается в корреляции между численностью отдельных таксонов микроорганизмов кишечника и пулом химических элементов в мышечной ткани, а перестройка микробного сообщества под действием нанокompозитов сопровождается реорганизацией этих связей;

– опосредованное поступление углеродных нанокompозитов в среду обитания вызывает разнонаправленный адаптационный ответ организмов пресноводной экосистемы, при этом чувствительность к нанокompозитной нагрузке возрастает от карпа к моллюску *Planorbis planorbis*, ряске малой *Lemna minor* и рачку *Daphnia magna*;

– углеродные нанокompозиты магния и марганца не угнетают фотосинтезирующие процессы в экосистеме, тогда как нанокompозит меди оказывает деструктивное действие на пигментный аппарат *Lemna minor* с развитием хлороза и снижением содержания хлорофиллов А и В и каротиноидов;

– дозировка 0,2 мг/кг корма является оптимальной для углеродных нанокompозитов магния, марганца и меди при их использовании в кормлении карпа в условиях пресноводной экосистемы.

Степень достоверности и апробация работы. Научные положения, выводы и предложения производству обоснованы и базируются на аналитических и экспериментальных данных, степень достоверности которых доказана путем статистической обработки.

Выводы и предложения основаны на научных исследованиях, проведенных с использованием современных методов анализа и расчета. Основные материалы диссертационной работы доложены на заседаниях кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» и отдела кормления сельскохозяйственных животных им. профессора С.Г. Леушина ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук».

Результаты научной работы доложены на научно-практических и научно-методических конференциях: Всероссийская научно-методическая конференция

«Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (Оренбург, 2025); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии» (Оренбург, 2025, 2026).

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 170 страницах компьютерной верстки, состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием материалов и методов исследований, глав собственных исследований, обсуждения полученных результатов, выводов, предложений производству. Содержит 32 таблицы и 23 рисунка. Список использованной литературы включает 183 источника, в том числе 119 зарубежных авторов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диссертационная работа выполнялась в период с 2024 по 2026 гг. на кафедре БЖСиА ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» с использованием методической и материально-технической базы ЦКП Института микро- и нанотехнологий ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» <http://www.osu.ru/doc/1328>, ФГБНУ «ФНЦ БСТ РАН» <https://цкп-бст.пф>, «Персистенция микроорганизмов», ФГБУН «Оренбургский ФИЦ УрО РАН» <https://ikvs.info/institut/laboratorii/czkip>.

В первой серии изучено влияние абиотических факторов технологических процессов рыбного хозяйства, препаратов углеродных нанокompозитов магния, марганца и меди в различных дозировках – на биосистему «микрофлора кишечника - организм хозяина (карп)». Во второй серии исследований изучено влияние препаратов углеродных нанокompозитов на аквабиосистему.

Для проведения первого исследования были тщательно подготовлены семь аквариумов по 300 литров каждый и последовательно сформирован биоценоз. На первом проведена водоподготовка, наполнены аквариумы, запущена система фильтров и в таком режиме после двух недель выдержки приступили к заселению годовиками карпа обыкновенного (*Cyprinus carpio*) с массой 40 – 45 г (n=70). Подопытная рыба была получена в ООО «Ирикларыба» и более 2 месяцев содержалась в лаборатории в одинаковых условиях. В период формирования биоценоза между аквариумами производился водообмен.

Учётный период составил 8 недель. Нормы кормления – 2-5 % от массы тела рыб, пересчет делали еженедельно. Препараты нанокompозитов вводили в экосистему через корма при скармливании карпу. Карпы контрольной группы получали корм без препаратов, в I группе рыбе в корм добавляли НЧ Mg-C 0,2 мг/кг, II - НЧ Mg-C 0,4 мг/кг, III - НЧ Mn-C 0,2 мг/кг, IV - НЧ Mn-C 0,4 мг/кг, в V - НЧ Cu-C 0,2 мг/кг, и в VI - НЧ Cu-C 0,4 мг/кг.

Для проведения второго исследования аналогичным образом были подготовлены аквариумы. После двух недель выдержки приступили к заселению ряской малой *Lemna minor* (n=100/аквариум). После чего постепенно аквариумы заселяли беспозвоночными консументами – катушкой роговой (*Planorbis planorbis*) (n=10/ аквариум) и рыбами-консументами первого порядка – карп обыкновенный (*Cyprinus carpio*) (n=50/ аквариум), а также дафнией большой (*Daphnia magna*) (n = 10/ аквариум). В аквариум I группы вносили нанокompозит Mg-C, II - Mn-C, в III - Cu-C, в дозировках 0,2 мг/кг корма. Контроль получал корм без препаратов.

Длительность основного учетного периода составляла 56 суток. Норма кормления – 1 % от массы тела рыб, пересчет делали еженедельно.

В исследованиях использовали препараты наночастиц металлов $d = 40-60$ нм (НЧ) Mg-C, Mn-C и Cu-C синтезированные методом плазменно-дуговой технологии на углеродной матрице в Институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск). Добавки (НЧ Mg-C, Mn-C и Cu-C) вносились в среду в составе кормов. Препараты наносили на корм путем напыления. Предварительно нанокompозит диспергировали при помощи ультразвукового гомогенизатора Scientz JY92-IIDN («Scientz», КНР).

Таксономический состав микрофлоры кишечника рыбы изучался с использованием материально-технической и методической базы ЦКП «Персистенция микроорганизмов» ИКВС УрО РАН (г. Оренбург).

Анализ содержания химических элементов в мышечной ткани рыб в рамках I эксперимента проводился в лаборатории ООО «Микронутриенты» г. Москва, (лицензия № Л041-01137-77/00370156) методом атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии на оборудовании Elan 9000 (Perkin Elmer, США) и Optima 2000 V (Perkin Elmer, США), в рамках II эксперимента определялся в ЦКП ФГБНУ «ФНЦ БСТ РАН» (г. Оренбург) масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на одноквадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, США).

Коэффициент загрязнения (C_f) определяли как отношение содержания каждого элемента в теле гидробионтов опытных групп к контрольной группе. Индекс потенциального экологического риска (R_i), рассчитывали для 10 химических элементов Hg, Cd, As, Co, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn и Mn.

Для оценки микробиологического состояния водной среды в ходе эксперимента определяли общее микробное число (ОМЧ) воды методом поверхностного посева на средах: ГРМ-агар, среда Эндо и Лакто-агар.

Морфологический и биохимический анализ крови карпа изучался в ЦКП ФГБНУ «ФНЦ БСТ РАН» г. Оренбург (аттестат аккредитации RA.RU.21ПФ59 от 12.10.2015). При исследовании крови использовались автоматический гематологический анализатор «URIT-2900 Vet Plus» (URIT Medical Electronic Group, Китай) и автоматический биохимический анализатор «DIRUI CS-T240» (Dirui Industrial Co., Ltd, Китай).

Для оценки влияния условий среды на состояние ряски малой (*Lemna minor*) изучали выживаемость растений, их физиологическое состояние, общую численность, а также содержание фотосинтезирующих пигментов.

В рамках исследования катушки роговой (*Planorbis planorbis*) изучали выживаемость моллюсков, интенсивность их роста, прирост живой массы, а также элементный состав тела. Определение живой массы и размеров осуществляли на 1-й, 4-й и 8-й неделях эксперимента, путем индивидуального взвешивания на весах.

В рамках исследования дафнии большой (*Daphnia magna*) оценивали их выживаемость, а также проводили визуальное наблюдение за их поведенческими реакциями. Различия между группами оценивали критерием хи-квадрат, попарные сравнения с контролем – двусторонним точным тестом Фишера.

Для оценки взаимодействий в системе «микробиом кишечника-организм хозяина (карп)» определяли величины коэффициентов корреляции Пирсона между составом микрофлоры кишечника и элементным составом тканей рыбы. Визуализацию данных проводили в среде R средствами пакета ggplot2.

Результаты обрабатывались с применением общепринятых методик с помощью программного обеспечения «Excel 2010» и «Statistica 10.0».

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Результаты I эксперимента

Оценка общего состояния рыбы в ходе исследований. На протяжении всего эксперимента оценка поведения и внешнего вида рыбы не выявила различий между контрольной и опытными группами. Рыба сохраняла активность, была подвижной, большую часть времени держалась в толще воды стай. Признаков инфекционных заболеваний или воздействия условно-патогенной микрофлоры не обнаружено. На протяжении исследования температура воды в аквариумах составила $22 \pm 2^\circ\text{C}$, уровень растворенного в воде кислорода – 6-9 мг/л, pH – $7 \pm 0,5$. Выживаемость рыб в группах составляла 100 %.

Микробиом кишечника *Cyprinus carpio*. Выявлены представители 18 бактериальных фил: *Abditibacteriota*, *Acidobacteriota*, *Actinomycetota*, *Bacillota*, *Bacteroidota*, *Bdellovibrionota*, *Campylobacterota*, *Chlamydiota*, *Chloroflexota*, *Cyanobacteriota*, *Deinococcota*, *Fusobacteriota*, *Patescibacteria*, *Pseudomonadota*, *Rhodothermota*, *Spirochaetota*, *Thermodesulfobacteriota* и *Verrucomicrobiota*.

Индекс разнообразия Шеннона повышался до 1,23-3,25 в V группе и до 1,42-2,56 в VI группе (рисунок 1А). Индекс разнообразия Симпсона в контрольной группе составил – 0,47-0,66 и повышался до 0,62-0,91 в V опытной группе и до 0,62-0,86 - в VI опытной группе (рис. 1Б).

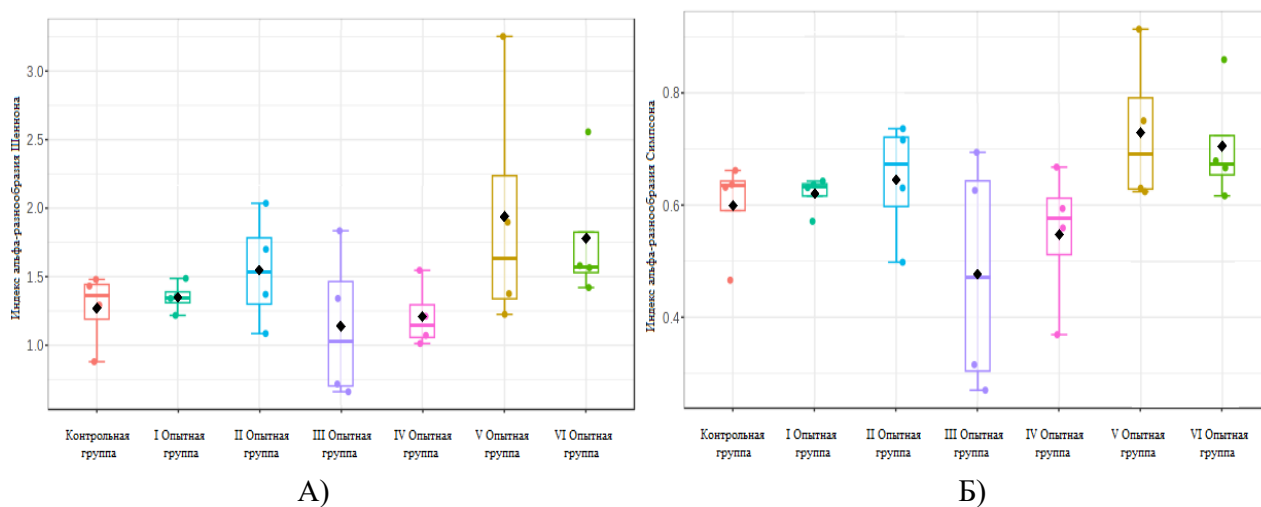


Рисунок 1 – Индексы разнообразия Шеннона и Симпсона кишечной микробиоты рыб:
А) Индекс разнообразия Шеннона, Б) Индекс разнообразия Симпсона

Анализ бета-разнообразия кишечной микробиоты методом главных координат на основе дистанций Брея-Кёртиса показал статистически значимые различия ($p=0,002$) между контролем и только II группой. На 2D диаграмме выделяется кластер образцов II группы, максимально удаленный от контрольной группы и образцов I группы (рисунок 2). В то же время, кишечная микробиота в остальных группах, не отличалась существенно от контроля.

В микробиоте кишечника на уровне родов (рисунок 3) в контроле доминировали *Aeromonas* (29,74-50,37%), *Cetobacterium* (37,17-67,73%) и *Culicoidibacter* (1,58-8,85%).

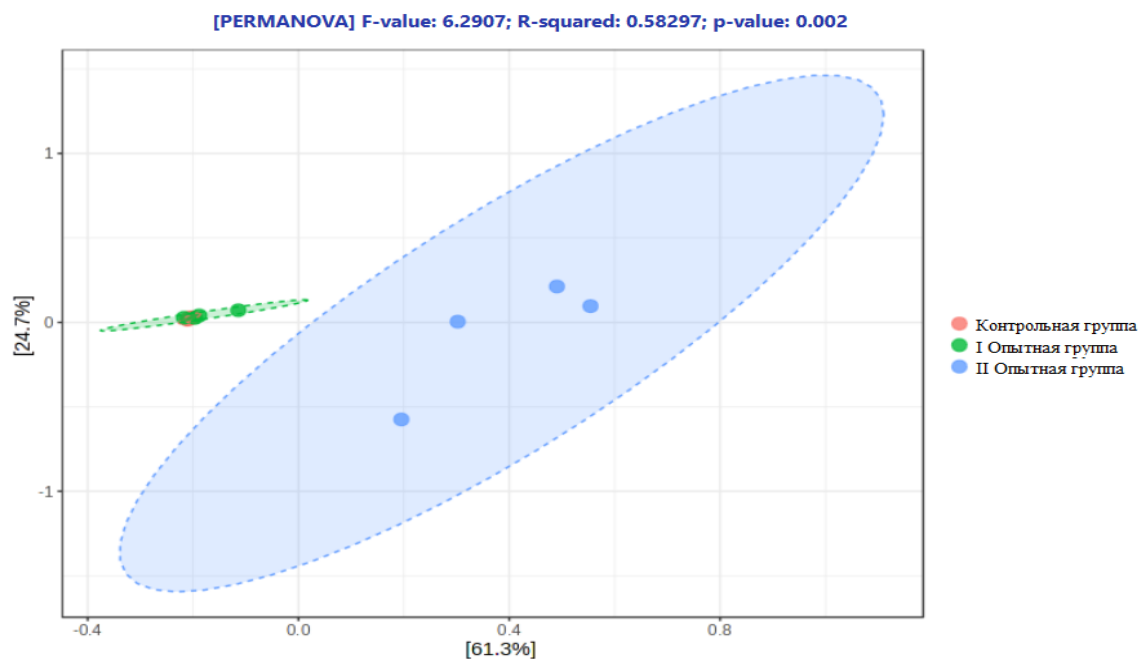


Рисунок 2 – 2D диаграмма ординации кишечной микробиоты рыб контрольной и опытных групп, получавших нанокompозит Mg-C

Во II группе возросла доля *Aurantimicrobium* до 5,03-15,25%, *Polynucleobacter* до 0,31-3,93% и *Brevinema* до 0,58-68,57%, снизилась доля *Culicoidibacter* до 0,01-0,32% и *Cetobacterium* до 0,09-14,59%. В III группе снижались *Aeromonas* до 5,61-27,71%. В IV группе возрастали *Aeromonas* до 37,79-83,13%, появился род *Kingella* в доле 0,01-0,10%. В V и VI группах снижались *Cetobacterium* до 4,06-36,92% и до 15,89-39,76% соответственно.

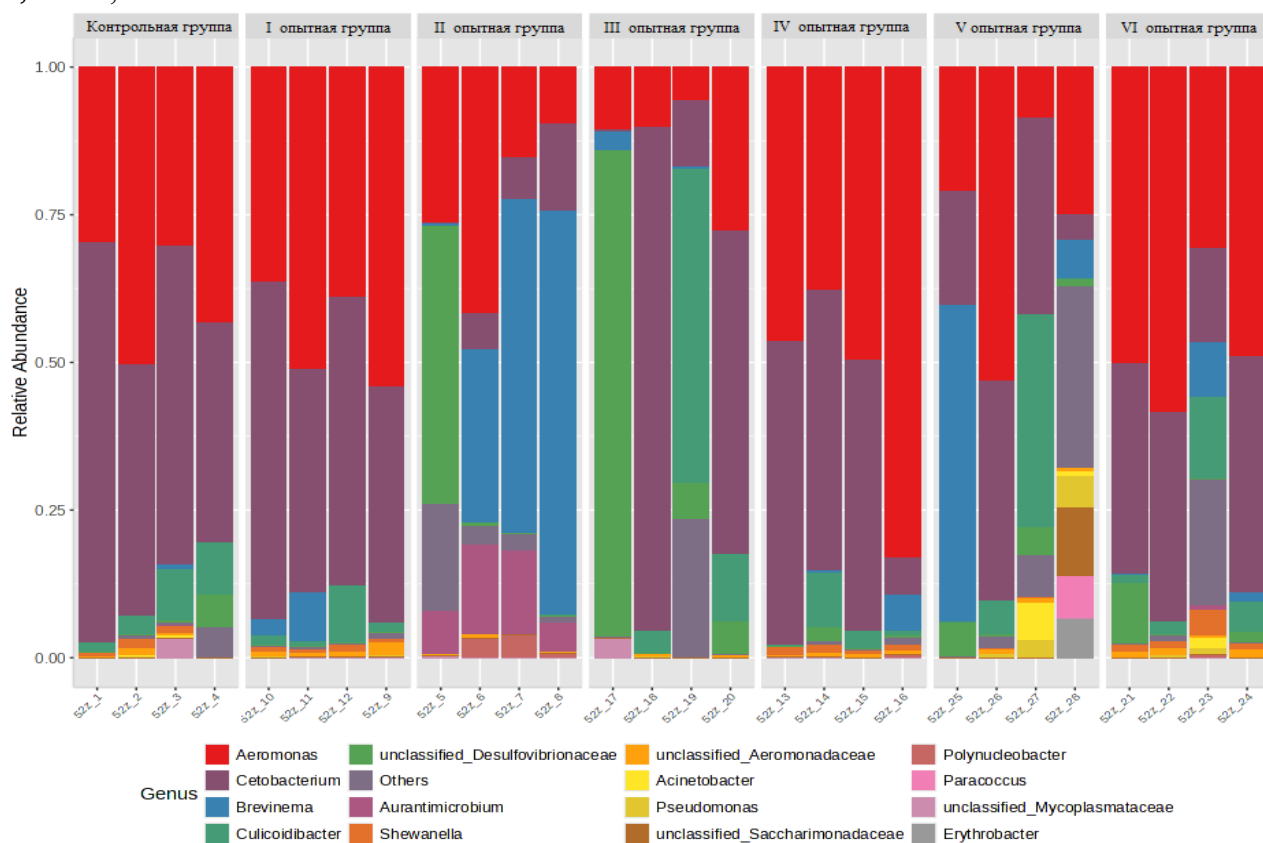


Рисунок 3 – Таксономический состав на уровне родов микробиоты рыб

Адаптационные изменения в организме карпа. Ростостимулирующий эффект проявлялся начиная с 6-й недели (рисунок 4), в III группе и составил 8,5 % ($p \leq 0,05$), 9,5 % ($p \leq 0,05$) и 10,8 % ($p \leq 0,01$) на 6, 7 и 8-й неделях соответственно.

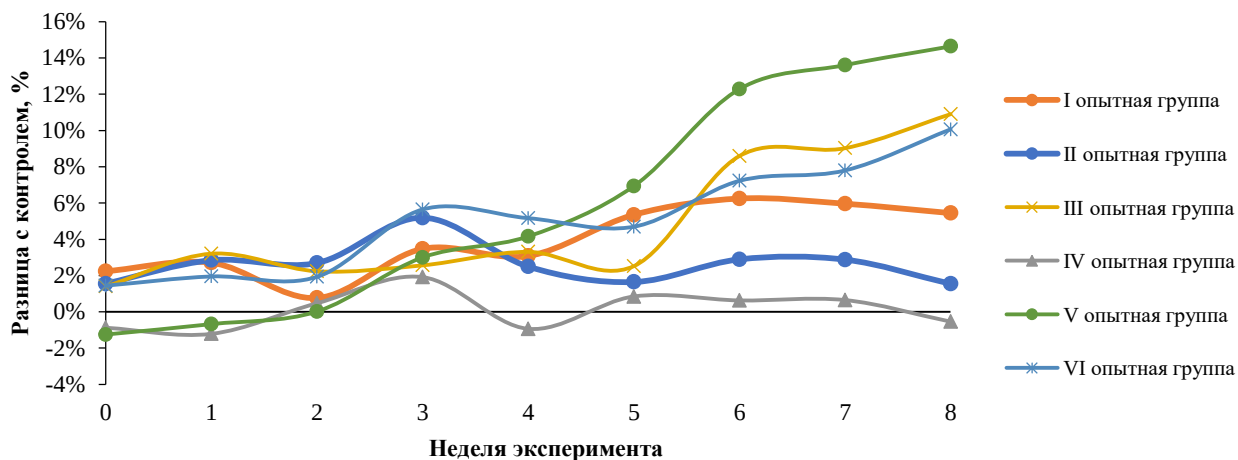


Рисунок 4 – Динамика роста рыб относительно значений контрольной группы, %

В V группе превышение контроля составило 12,1 % ($p \leq 0,01$), 13,6 % ($p \leq 0,01$) и 15,3 % ($p \leq 0,001$) на 6, 7 и 8-й неделях соответственно, в VI группе статистически значимая разница составила 7,2 % ($p \leq 0,05$) и 7,5 % ($p \leq 0,05$) соответственно, в конце исследования разница достигала 10,8 % ($p \leq 0,01$).

Оценка характера и направленности адаптационного ответа по морфологическому и биохимическому составу крови карпа показала отличия, в I группе снижение эритроцитов на 31,3 % ($p \leq 0,05$), гематокрита на 29,0 % ($p \leq 0,05$), лейкоцитов на 19,6 % ($p \leq 0,01$), гемоглобина на 18,8 % ($p \leq 0,01$), мочевины на 45,0 % ($p \leq 0,05$), АСТ на 44,1 % ($p \leq 0,01$) и железа на 37,5 % ($p \leq 0,05$), с повышением общего белка на 34,5 % ($p \leq 0,01$) и альбумина на 33,6 % ($p \leq 0,05$). Во II группе повышение тромбоцитов на 117,1 % ($p \leq 0,001$), холестерина на 119,2 % ($p \leq 0,01$) и общего белка на 19,7 % ($p \leq 0,05$), в то же время снижение эритроцитов на 28,4 % ($p \leq 0,05$), лейкоцитов на 23,0 % ($p \leq 0,01$), АЛТ на 44,6 % ($p \leq 0,05$) и железа на 33,7 % ($p \leq 0,05$). В III группе повышение холестерина на 131,5 % ($p \leq 0,001$), глюкозы на 73,4 % ($p \leq 0,01$), фосфора на 49,6 % ($p \leq 0,05$), альбумина на 49,5 % ($p \leq 0,05$), общего билирубина на 43,3 % ($p \leq 0,01$), кальция на 34,5 % ($p \leq 0,05$), общего белка на 31,9 % ($p \leq 0,05$) и снижение эритроцитов на 62,7 % ($p \leq 0,001$), гематокрита на 61,6 % ($p \leq 0,001$), лейкоцитов на 39,9 % ($p \leq 0,001$), гемоглобина на 38,0 % ($p \leq 0,001$), тромбоцитов на 24,1 % ($p \leq 0,05$), железа на 39,5 % ($p \leq 0,01$). В IV группе снижение гематокрита на 48,1 % ($p \leq 0,01$), эритроцитов на 47,8 % ($p \leq 0,01$), лейкоцитов на 36,5 % ($p \leq 0,001$), гемоглобина на 27,9 % ($p \leq 0,001$) и билирубина на 44,9 % ($p \leq 0,05$), с повышением холестерина на 99,2 % ($p \leq 0,01$) и общего белка на 43,2 % ($p \leq 0,01$). В V группе снижение тромбоцитов на 40,4 % ($p \leq 0,01$), лейкоцитов на 12,9 % ($p \leq 0,05$), АСТ на 58,2 % ($p \leq 0,01$), АЛТ на 34,7 % ($p \leq 0,05$), железа на 31,7 % ($p \leq 0,05$), фосфора на 31,0 % ($p \leq 0,05$) и повышение холестерина на 70,0 % ($p \leq 0,01$), альбумина на 46,7 % ($p \leq 0,05$), глюкозы на 38,4 % ($p \leq 0,05$). В VI группе снижение эритроцитов на 29,9 % ($p \leq 0,05$), гематокрита на 24,4 % ($p \leq 0,05$), лейкоцитов на 21,8 % ($p \leq 0,01$), гемоглобина на 20,3 % ($p \leq 0,01$), железа на 35,7 % ($p \leq 0,01$) и повышение холестерина на 104,6 % ($p \leq 0,001$), альбумина на 56,1 % ($p \leq 0,01$), кальция на 30,5 % ($p \leq 0,05$) и глюкозы на 28,7 % ($p \leq 0,05$).

Исследование потоков минеральных веществ в экосистеме. Включение в рацион карпа нанокompозитов корма сопровождалось выраженной перестройкой

элементного статуса мышечной ткани карпа на основании достоверных изменений в концентрации химических элементов в опытных группах по отношению к контролю, были сформированы элементные профили (ЭП) групп:

$$\text{ЭП (I)} = \frac{\uparrow P, B, Fe, Pb}{\downarrow Ca, Si, Zn, Be, As, Cd, Hg};$$

$$\text{ЭП (II)} = \frac{\uparrow Li, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Al, Pb}{\downarrow Ca, Cd, Hg};$$

$$\text{ЭП (III)} = \frac{\uparrow Na, V, Fe, Ni, Zn, Be, Al, Sn, Pb}{\downarrow Ca, Cd, Hg};$$

$$\text{ЭП (IV)} = \frac{\uparrow B, V, Cr, Ni, Cu, Se, I, Pb}{\downarrow Ca, Na, Be, Cd, Sn, Hg};$$

$$\text{ЭП (V)} = \frac{\uparrow I, Be, Al, Pb}{\downarrow Ca, Cd, Sn};$$

$$\text{ЭП (VI)} = \frac{\uparrow As, Pb}{\downarrow Ca, Mn, Se, Cd, Sn};$$

Между тем нагрузка экосистемы сопровождалась изменениями в обмене всех макроэлементов, со снижением до 65,2 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в I группе, 72,8 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) во II группе, 84,0 ммоль/кг в III группе, 68,5 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в IV группе, 72,9 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в V группе и 51,7 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в VI группе. Среди микроэлементов наблюдалось снижение в I группе до 2,48 ммоль/кг, и увеличение до 2,98 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) во II группе, 2,77 ммоль/кг в III группе, 2,78 ммоль/кг в IV группе, 2,64 ммоль/кг в V группе и 2,63 ммоль/кг в VI группе. Токсические элементы снижались до 0,16 ммоль/кг в I группе и повышались до 0,43 ммоль/кг ($p \leq 0,001$) во II группе, до 0,24 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) III группе, 0,19 ммоль/кг в IV группе 0,24 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в V группе и 0,19 ммоль/кг в VI группе.

Накопление элементов в мышечной ткани рыбы привело к изменению коэффициентов загрязнения (рисунок 5).

Во всех группах большая часть химических элементов находилась в пределах умеренного уровня загрязнения ($1 \leq C_f \leq 3$).

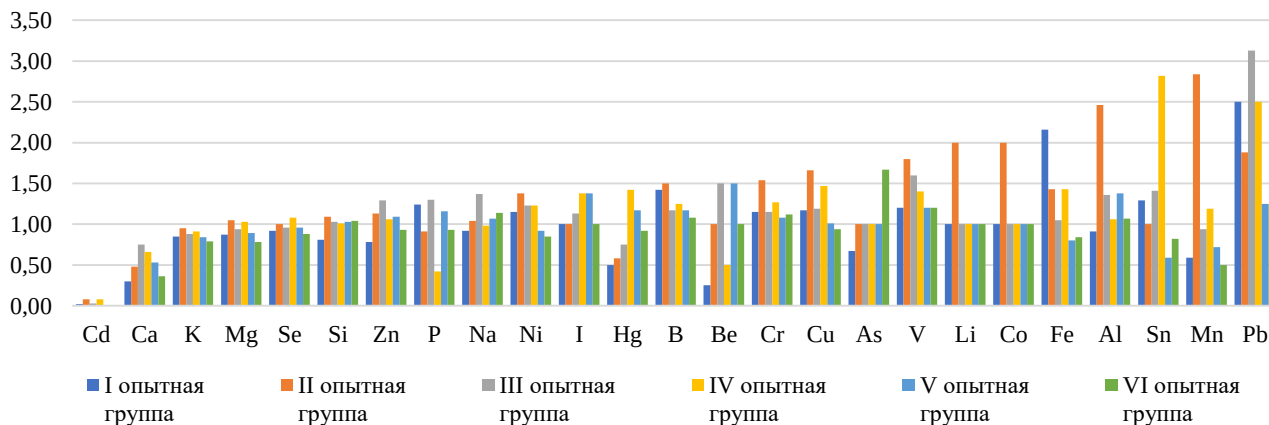
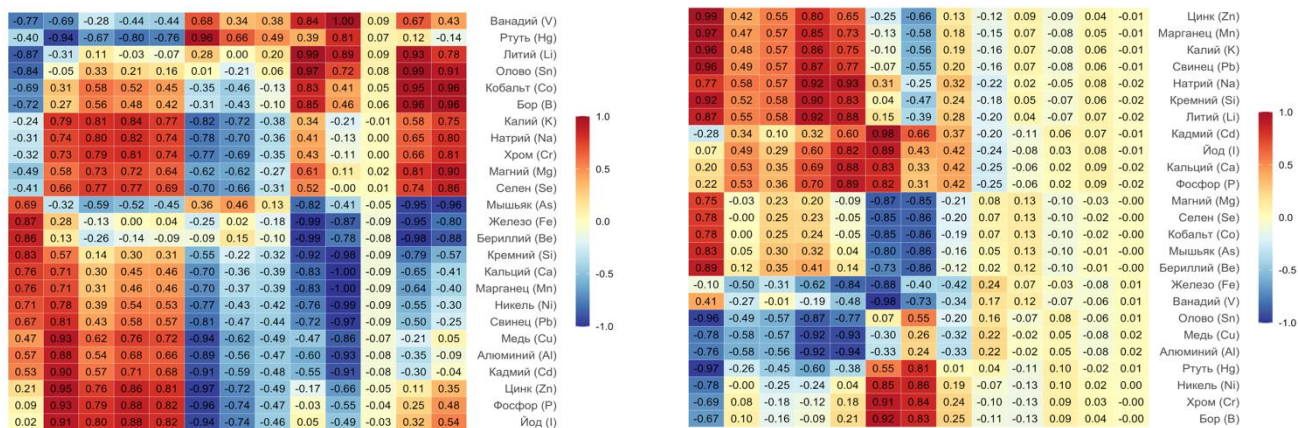


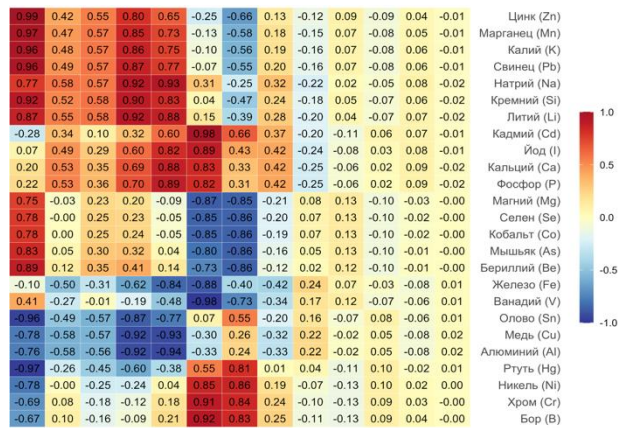
Рисунок 5 – Коэффициенты загрязнения (C_f) химических элементов в мышечной ткани рыбы

В III группе Pb (3,13) находился в диапазоне высокого уровня загрязнения ($3 \leq C_f \leq 6$). Индекс потенциального экологического риска находился в пределах низкого риска ($R_i < 150$). В I группе – 60,1, во II – 77,3, в III – 78,2, в IV – 105,0, в V – 82,0, в VI – 77,7.

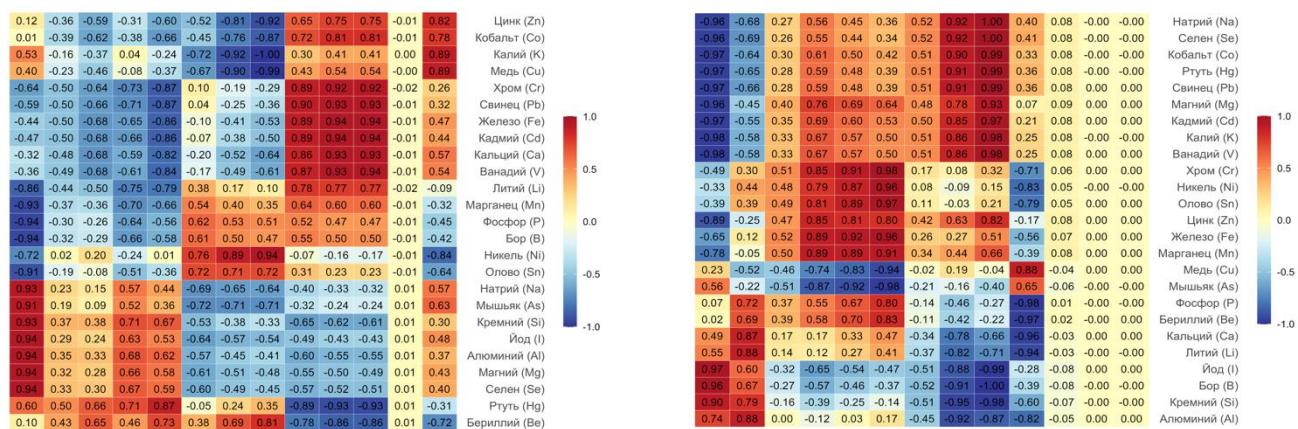
Взаимодействия в биосистеме «микрофлора кишечника-организм хозяина (карп)»: корреляционные связи между составом микрофлоры кишечника и показателями элементного статуса рыбы. Для оценки взаимосвязи между элементным профилем и количественным составом микробиома кишечника карпа был проведен корреляционный анализ с расчетом коэффициентов линейной корреляции Пирсона (рисунок 6).



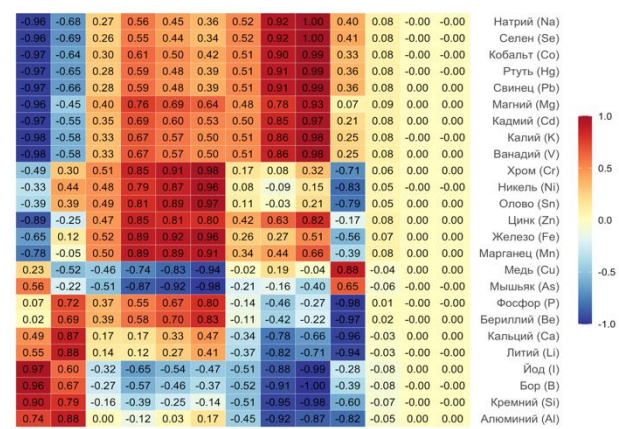
А)



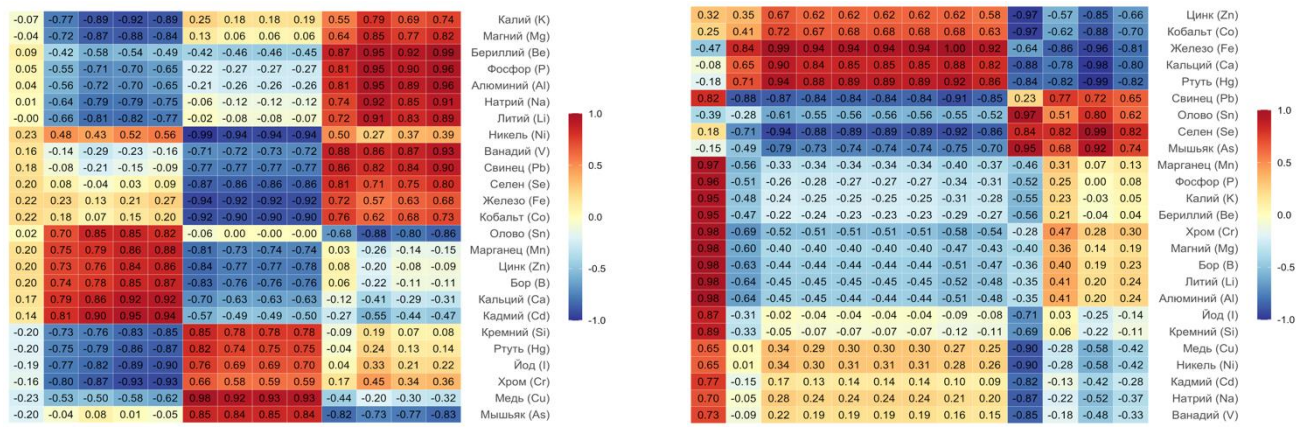
Г)



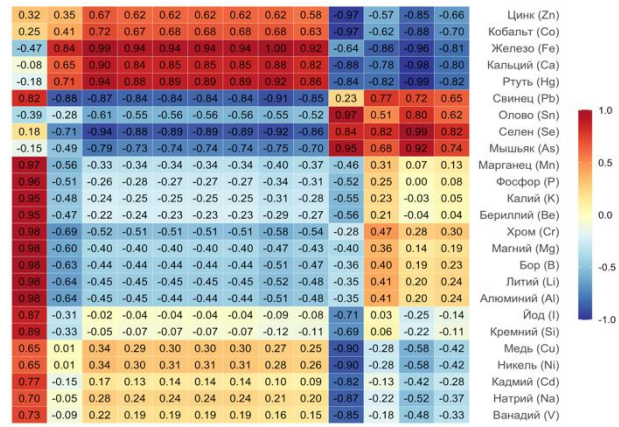
Б)



Д)



В)



Е)

Рисунок 6 – Тепловая карта корреляции накопления химических элементов и количественного состава микробиома кишечника карпа на уровне родов: А) I группа, Б) II группа, В) III группа, Г) IV группа, Д) V группа, Е) VI группа.

Включение нанокмппозитов в рацион привело к изменению структуры связей между таксонами микробиома и накоплением элементов в мышечной ткани карпа. В I группе род *Cetobacterium* положительно коррелировал с Hg ($r=0,96$) и отрицательно с Zn ($r=-0,97$), P ($r=-0,96$), I, Cu ($r=-0,94$) и Cd ($r=-0,91$). Во II группе род *Flavobacterium* прямо коррелировал с Mg, I, Se и Al ($r=0,94$), а также Na ($r=0,93$) и обратно с P, B ($r=-0,94$), Mn ($r=-0,93$). В III группе род *Culicoidibacter* положительно коррелировал с Cu ($r=0,98$) и отрицательно с Ni ($r=-0,99$) и Fe ($r=-0,94$), тогда как *Cetobacterium* показал прямую связь с Be, P, Al ($r=0,95$), сходный, но менее выраженный профиль отмечен у рода *Acinetobacter*. В IV группе *Culicoidibacter* положительно коррелировал с Na и Li ($r=0,92$) и отрицательно с Cu и Al ($r=-0,92$); род *Shewanella* показал прямую связь с Cd ($r=0,98$) и обратную с V ($r=-0,98$), В V группе род *Brevinema* положительно коррелировал с I ($r=0,97$) и B ($r=0,96$) и отрицательно с V, K и Cd ($r=-0,98$), а *Culicoidibacter* положительно с Fe ($r=0,92$) и отрицательно с As ($r=-0,92$), при аналогичном профиле рода *Acinetobacter*. В VI группе род *Aeromonas* показал прямую связь с Se ($r=0,99$) и As ($r=0,92$) и обратную с Hg ($r=-0,99$) и Ca ($r=-0,98$), тогда как *Shewanella* положительно коррелировал с Fe ($r=0,94$) и отрицательно с Se ($r=-0,88$); сходные связи демонстрировали роды *Aurantimicrobium*, *Chryseobacterium*, *Polynucleobacter*, *Culicoidibacter* и *Acinetobacter*.

3.2 Результаты II эксперимента

Оценка общего состояния экосистемы в ходе исследований. На протяжении эксперимента поведение и внешний вид рыбы не различались между контрольной и опытными группами. Карпы сохраняли активность и подвижность, активно поедали корм и реагировали на раздражители. При вскрытии патологоанатомических изменений не обнаружено. Состояние сопутствующих консументов также оставалось в пределах нормы: катушки (*Planorbis planorbis*) сохраняли подвижность и целостность раковины; ряска (*Lemna minor*) сохраняла тургор и естественную окраску листочков без признаков хлороза в I и II опытных группах, тогда как в III группе отмечался хлороз листочков. В течение исследования температура воды составляла 22 ± 2 °C, содержание растворённого кислорода – 6–9 мг/л, pH $7\pm 0,5$.

Динамика численности популяции *Daphnia magna*. Опосредованное включение нанокмппозитов в среду обитания оказало влияние на выживаемость дафний. Выраженность эффекта различалась между группами (рисунок 7).

В I группе на 1-й неделе смертность составляла 10,0 %, на 2-й неделе возросла до 42,9 %. На 4–7-ой неделях показатель постепенно снижался с 35,7 до 18,2 %, но на 8-й неделе поднимается до 52,6 %. Кумулятивная гибель составила 35 особей, итоговая выживаемость – 20,5 %. Во II группе смертность на 1-й неделе составляла 40,0%, на 3-й неделе – 43,8%, на 4-ой неделе – 35,7%. На 6-7 неделях наблюдалось снижение на 20,0 и 14,3% соответственно, к концу эксперимента на 8-й неделе эксперимента смертность достигла максимального значения – 71,4%. Суммарная гибель составила 40 особей, итоговая выживаемость – 9,1% ($p<0,01$). В III группе на 1–2-й неделях смертность составляла 30,0 и 21,4%, на 3-й неделе зафиксировано максимальное значение – 53,3%, на 4-6 неделях снижалась на 30,8%, 23,1 и 13,3% соответственно, затем наблюдалось повышение до 30,8% на 7-й неделе и 38,9% на 8-й неделе. Всего погибло 34 особи, итоговая выживаемость составила 24,4%.

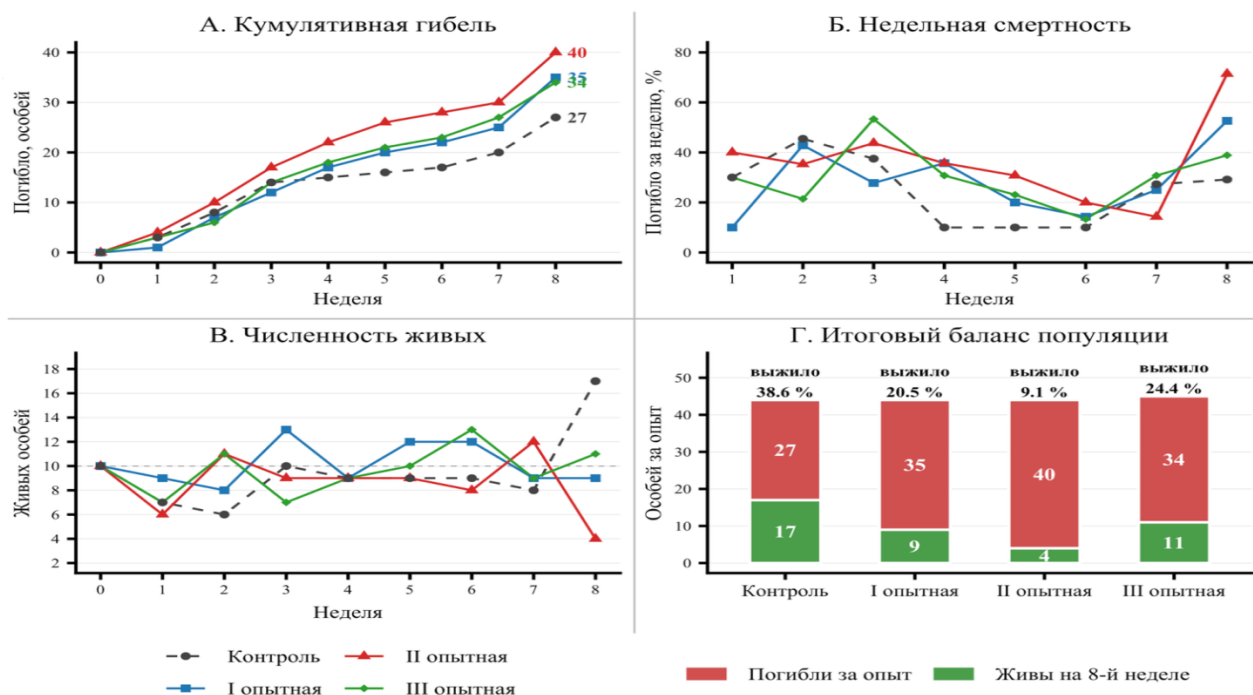


Рисунок 7 – Выживаемость и смертность *Daphnia magna*: А) кумулятивная гибель; Б) недельная смертность; В) численность живых особей; Г) итоговый баланс популяции.

Оценка микробиологического состояния водной среды экосистемы в ходе исследований. Относительно контроля КМАФАнМ на 3-й неделе в III группе превышал на 71,3% ($p \leq 0,05$). К 8-й неделе повышение было в I группе на 106,8% ($p \leq 0,01$) и в III группе на 31,9% ($p \leq 0,05$), и снижено во II группе на 47,0% ($p \leq 0,01$). На 3-й неделе в сравнении с началом эксперимента наблюдалось снижение в I группе на 70,4% ($p \leq 0,05$), во II группе на 53,0% ($p \leq 0,05$) и повышение в контроле на 517,5% ($p \leq 0,01$), и в III группе на 116,9% ($p \leq 0,01$). На 8-й неделе в сравнении с началом в контроле повышение составило 777,5% ($p \leq 0,001$), в III группе – 137,4% ($p \leq 0,001$), во II группе сохранялось снижение на 70,2% ($p \leq 0,05$). Грамотрицательные микроорганизмы семейства Энтеробактерий, к концу эксперимента снижались относительно контроля, в I группе на 72,0% ($p \leq 0,05$), во II группе на 92,0% ($p \leq 0,01$) и в III группе на 76,0% ($p \leq 0,05$). В сравнении с началом эксперимента на 3-й неделе наблюдалось снижение в I группе на 69,2% ($p \leq 0,01$) и во II группе на 89,4% ($p \leq 0,01$) при повышении в III группе на 47,8% ($p > 0,05$). К концу эксперимента относительно начала эксперимента снижение в контроле на 60,3% ($p \leq 0,05$), в I группе на 97,6% ($p \leq 0,001$), во II группе на 99,7% ($p \leq 0,001$) и в III группе на 87,0% ($p \leq 0,05$). ОМЧ лактобацилл относительно контроля в начале эксперимента повышалось в I и II группах на 410% ($p \leq 0,01$) и снижалось в III группе на 50%, после чего на 8-й неделе зафиксировано повышение на 843,6% ($p \leq 0,001$). В сравнении с началом пул лактобактерий в контроле к 8-й неделе возросли на 290% ($p \leq 0,05$). В I и II группах напротив, снизился на 7,8% ($p > 0,05$) и на 43,1% ($p \leq 0,05$) соответственно. В III группе на 3-й неделе зафиксировано увеличение в 9 раз (+800%, $p \leq 0,05$), а к 8-й неделе более чем в 73 раза (+7260%, $p \leq 0,001$).

Адаптационные изменения в организме карпа. На протяжении всего эксперимента достоверных различий по динамике роста в сравнении с контролем выявлено не было. В I группе масса рыб в отдельные периоды незначительно превышала значения контроля и к концу эксперимента составила 2,12%. Во II группе прирост массы был ниже контрольных значений и зафиксировался на уровне -3,89% с

5 недели эксперимента. В III группе снижение наблюдалось с 1 недели эксперимента достигая максимальных значений на 7 неделе (-9,17%).

Присутствие в среде обитания нанокompозитов отразилось в изменении обмена минеральных веществ в организме карпа. Достоверные различия в группах относительно контроля сформированы в элементный профиль (ЭП):

$$\text{ЭП (I)} = \frac{\uparrow \text{Zn,Cd}}{\downarrow \text{Na,Fe,I,Bi,Hg}}; \text{ЭП (II)} = \frac{\uparrow \text{Mo,Ba,As,Sb}}{\downarrow \text{Na,K,Cr,Fe,Cu,Se,I,Hg}}; \text{ЭП (III)} = \frac{\uparrow \text{Mn,Zn,Li,Mo,Ba,Al,Pb,Sb}}{\downarrow \text{Na,K,Cr,I,Hg}}$$

Кроме того поступление нанокompозитов в экосистему привело к изменениям в обмене пула макроэлементов сопровождающееся снижением до 354 ммоль/кг в I группе и повышением до 387 ммоль/кг в II группе и 371 ммоль/кг в III группе. Обмен пула микроэлементов повышался до 0,89 ммоль/кг в I группе, 0,97 ммоль/кг в III группе и снижался до 0,82 ммоль/кг во II группе. Среди токсических элементов зафиксировано снижение до 0,80 ммоль/кг в I группе и повышением до 0,96 ммоль/кг во II группе и до 1,26 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) в III группе.

Достоверные различия в группах относительно начала эксперимента сформированы в элементный профиль (ЭП):

$$\begin{aligned} \text{ЭП (K)} &= \frac{\uparrow \text{Ca,Cr,I,B}}{\downarrow \text{K,Mg,Co,Cu,Zn,Se,Li,Bi}}; & \text{ЭП (I)} &= \frac{\uparrow \text{Ca,Cr,Li,Mo,B,Cd}}{\downarrow \text{K,Mg,Na,Fe,Co,Cu,Zn,Se,Bi,Hg,Sb}}; \\ \text{ЭП (II)} &= \frac{\uparrow \text{Ca,P,Li,Mo,B,Sr}}{\downarrow \text{K,Mg,Na,Cr,Fe,Co,Cu,Zn,Se,Bi,Hg,Tl}}; & \text{ЭП (III)} &= \frac{\uparrow \text{Ca,Na,Cr,Ni,Mo,B,Al,Pb,Sr}}{\downarrow \text{K,Mg,Na,Co,Cu,Zn,Se,I,Bi,Hg}} \end{aligned}$$

Относительно начала эксперимента изменения в обмене пула макроэлементов сопровождалось увеличением во всех группах до 361 ммоль/кг в контроле, 354 ммоль/кг в I группе, 387 ммоль/кг во II группе и 371 ммоль/кг в III группе. Пул всех микроэлементов снизился до 0,86 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в контроле, 0,89 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в I группе, 0,82 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) во II группе, 0,97 ммоль/кг в III группе. Пул токсических элементов повысился до 0,85 ммоль/кг в контроле, 0,80 ммоль/кг в I группе, 0,96 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) во II группе и до 1,26 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) в III группе.

Присутствие нанокompозитов также повышало концентрацию эритроцитов в крови карпа, в I группе на 47,4% ($p \leq 0,01$) и во II группе на 16,9% ($p \leq 0,01$). Лейкоциты повышались в III группе на 15,1% ($p \leq 0,05$).

Адаптационные изменения *Lemna minor*. В I группе на 1-й неделе отмечено резкое снижение численности до 64 особей с последующим восстановлением до 87 особей на 6-й неделе и спадом до 78 особей к концу эксперимента, со средней удельной скоростью роста -0,004 сут⁻¹. Во II группе наблюдался рост до 142 особей на 3-й неделе с постепенным снижением до 78 особей к концу, средняя удельная скорость роста составила -0,004 сут⁻¹. В III группе зафиксирован рост до 139 особей к 5-й неделе и последующее резкое снижение до 44 особей, средняя удельная скорость роста составила -0,01 сут⁻¹.

Характеристика фотосинтезирующих процессов *Lemna minor*. Относительно данных, полученных в начале и в конце эксперимента, зафиксированы изменения в фотосинтетических пигментах *Lemna minor* во всех опытных группах. В I группе снижение хлорофилла Б на 35,9% ($p \leq 0,05$). Во II группе снижение хлорофилла А на 26,0% ($p \leq 0,05$), хлорофилла Б на 43,6% ($p \leq 0,05$) и каротиноидов на 28,0% ($p \leq 0,05$). В III группе снижение хлорофилла А на 54,0% ($p \leq 0,01$), хлорофилла Б на 59,6% ($p \leq 0,01$) и каротиноидов на 54,0% ($p \leq 0,001$). Относительно контроля достоверные значения были получены только в III группе со снижением хлорофилла

А на 26,5% ($p \leq 0,05$), хлорофилла Б на 44,7% ($p \leq 0,01$) и каротиноидов на 27,6% ($p \leq 0,05$).

Адаптационные изменения *Planorbis planorbis*. Достоверные изменения в ростовых показателях относительно контроля отмечались в I группе на 4 и 8 неделях эксперимента снижаясь до 25,2% ($p \leq 0,05$) и 33,3% ($p \leq 0,05$) соответственно. Присутствие в среде обитания нанокompозитов отразилось в изменении обмена минеральных веществ в организме *Planorbis planorbis*.

Достоверные различия в опытных группах относительно контроля сформированы в элементный профиль (ЭП):

$$\begin{aligned} \text{ЭП(I)} &= \frac{\uparrow \text{Ca, Mg, Na, Fe, Co, Ni, Ba, Bi, Sr}}{\downarrow \text{K, P, Cr, Cu, Zn, Se, I, Al, As, Cd, Hg, Pb, Ti, Sb}}; & \text{ЭП(II)} &= \frac{\uparrow \text{Ca, P, Cr, Mn, Zn, Hg, Sr}}{\downarrow \text{Cu, Li, Mo, Al, Pb}}; \\ \text{ЭП(III)} &= \frac{\uparrow \text{Ca, Mg, Na, Cr, Fe, Co, Ni, Ba, Sr}}{\downarrow \text{K, P, Zn, Se, I, Al, As}} \end{aligned}$$

Поступление нанокompозитов в экосистему приводило к повышению общего пула макроэлементов до 987 ммоль/кг ($p \leq 0,001$) в I группе, 371 ммоль/кг во II группе и 749 ммоль/кг ($p \leq 0,001$) в III группе. Пул микроэлементов повышался до 3,77 ммоль/кг в I группе, 3,63 ммоль/кг в III группе и снижался до 2,86 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) во II группе. Пул токсических элементов повышался до 3,74 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) в I группе, до 3,41 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) в III группе и снижался во II группе до 2,46 ммоль/кг.

Достоверные различия в группах относительно начала эксперимента сформированы в элементный профиль (ЭП):

$$\begin{aligned} \text{ЭП (K)} &= \frac{\uparrow \text{K, P, Se, I, As, Hg}}{\downarrow \text{Ca, Mg, Na, Fe, Co, Ni, Ba, Al, Sr}} & \text{ЭП (I)} &= \frac{\uparrow \text{Ca, Mg, Na, Fe, Co, Ba, Sr}}{\downarrow \text{P, Cr, Cu, Zn, I, Al, Cd, Pb, Sb}} \\ \text{ЭП (II)} &= \frac{\uparrow \text{K, P, Zn, Se, I, Cd, Hg}}{\downarrow \text{Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Ni, Mo, Al, Pb}} & \text{ЭП (III)} &= \frac{\uparrow \text{Ca, Cr, Sr}}{\downarrow \text{P, Zn, Cu, Al}} \end{aligned}$$

Относительно начала эксперимента наблюдали снижение пула макроэлементов до 324 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) в контроле, 371 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) во II группе и повышению до 987 ммоль/кг ($p \leq 0,01$) в I группе, и 749 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в III группе. В то же время пул микроэлементов снижался до 3,49 ммоль/кг в контроле, до 2,86 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) во II группе, до 3,63 ммоль/кг в III группе и повышался до 3,77 ммоль/кг в I группе. Пул токсических элементов снижался до 2,66 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) в контроле, до 2,46 ммоль/кг ($p \leq 0,05$) во II группе, до 3,41 ммоль/кг в III группе и повышением до 3,74 в I группе.

Оценка потенциального экологического риска накопления химических элементов в организмах *Cyprinus carpio* и *Planorbis planorbis*. Полученные данные по элементному статусу позволяют провести оценку загрязнения химическими элементами в теле карпа (рисунок 8).

Во всех группах элементы находились в пределах низкого и умеренного уровней загрязнения. Индекс потенциального экологического риска находился в пределах низкого риска. В I группе индекс составил 105,1, во II группе – 93,1 в III группе – 93,6.

Аналогичную оценку загрязнения химическими элементами и потенциального экологического риска провели для катушки (рисунок 9).

Во всех группах химические элементы находились в пределах низкого и умеренного уровней загрязнения, за исключением Ca (3,34) в I группе и Cr (3,45) в III группе входивших в диапазон высокого уровня загрязнения ($3 \leq C \leq 6$). Во всех опытных группах индекс потенциального экологического риска находился в пределах

низкого риска. В I группе индекс составил 56,6, во II группе – 130,0 в III группе – 87,9.

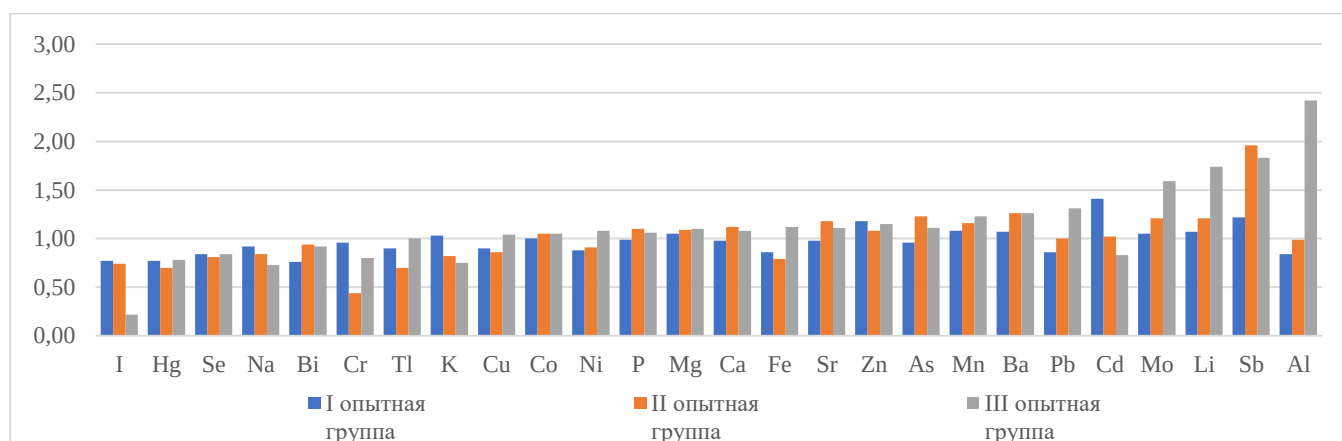


Рисунок 8 – Коэффициенты загрязнения химических элементов в теле карпа

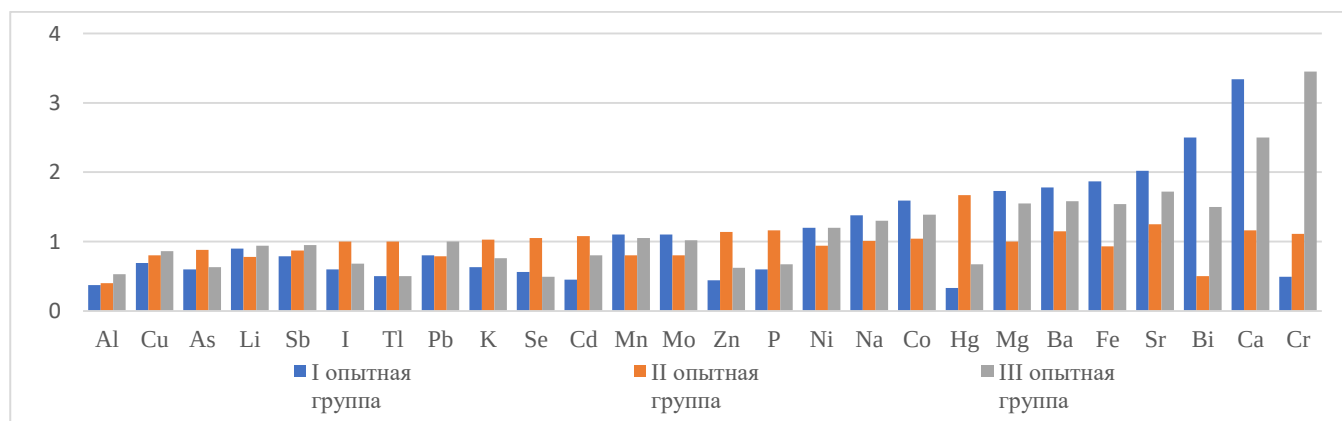


Рисунок 9 – Коэффициенты загрязнения химических элементов в теле катушки

4 ВЫВОДЫ

1. Кишечная микробиота *Cyprinus carpio* представлена 18 бактериальными филами при доминировании *Pseudomonadota* (30,50–54,04%), *Fusobacteriota* (37,17–67,73%) и *Bacillota* (1,59–11,96%). Поступление с кормом нанокompозита Cu-C повышает индексы альфа-разнообразия: индекс Шеннона составил 1,94 и 1,78, индекс Симпсона – 0,73 и 0,71 при дозировках 0,2 и 0,4 мг/кг корма против 1,27 и 0,60 в контроле. Достоверные различия бета-разнообразия по дистанциям Брея–Кёртиса ($p=0,002$) установлены только при Mg-C 0,4 мг/кг корма, что свидетельствует о сохранении базовой архитектуры сообщества при остальных нагрузках. Изменения таксономического состава носят дозозависимый характер: Mg-C 0,4 мг/кг корма увеличивает долю *Actinomycetota* до 5,04–15,81% и *Spirochaetota* до 0,92–68,57% (0–0,27% и 0–1,02% в контроле), Cu-C 0,4 мг/кг корма – долю *Pseudomonadota* на 34% при снижении *Fusobacteriota* на 37% и *Fusobacteriaceae* на 37% с увеличением *Shewanellaceae* на 120%. Происходит замещение представителей нормальной микробиоты рыб (род *Cetobacterium*, семейство *Fusobacteriaceae*, фила *Fusobacteriota*; род *Culicoidibacter*, фила *Bacillota*) на спирохет (род *Brevinema*), актиномицеты (род *Aurantimicrobium*) и факультативно-анаэробные грамотрицательные палочки (роды *Polynucleobacter*, *Shewanella*, фила *Pseudomonadota*).

2. Включение в рацион карпа углеродных нанокompозитов не снижает сохранности рыбы и обеспечивает ростостимулирующий эффект с шестой недели,

при использовании Cu-C 0,2 мг/кг корма превышение контроля составило 12,1% ($p \leq 0,01$), 13,6% ($p \leq 0,01$) и 15,3% ($p \leq 0,001$) на 6, 7 и 8 неделях соответственно, при использовании Mn-C в той же дозировке на 8,5% ($p \leq 0,05$), 9,5% ($p \leq 0,05$) и 10,8% ($p \leq 0,01$). В то же время повышение дозировки до 0,4 мг/кг дополнительного эффекта не приносит. Гематологический ответ характеризуется угнетением системы кроветворения, максимальной при нагрузке Mn-C, гипергликемией в группах Mn-C 0,2 мг/кг и Cu-C, и гиперхолестеринемией практически во всех опытных группах; снижение АЛТ и АСТ в отсутствие признаков цитолиза не позволяет трактовать действие нанокмполитов как гепатотоксическое. Независимо от природы металла достоверно снижается концентрация кальция, при нагрузке Mg-C – на 70,3 и 51,5% ($p \leq 0,001$), при нагрузке Mn-C – на 25% ($p \leq 0,05$) и 34% ($p \leq 0,01$), при нагрузке Cu-C на 46,7 и 63,7% ($p \leq 0,001$). Все препараты снижают содержание кадмия на 90,0–98,9% ($p \leq 0,001$), а Mg-C и Cu-C в том числе и ртути, при этом уровень самих вносимых металлов в большинстве случаев не изменяется. Состав микробиома селективно связан с элементным статусом рыбы: род *Aurantimicrobium* коррелирует с Cu ($r=0,91$) и Ca ($r=-0,93$), род *Aeromonas* с As ($r=0,92$), Pb ($r=0,84$) и Si ($r=-0,94$), род *Cetobacterium* – с Si ($r=0,74$) и As ($r=-0,73$), причём нанокмполиты реорганизуют эти связи композит-специфичным образом.

3. Опосредованное поступление нанокмполитов в дозировке 0,2 мг/кг корма формирует субтоксическую нагрузку на нижние трофические уровни экосистемы при сохранении состояния рыбы. Достоверных различий по росту карпа не установлено при разнонаправленной тенденции (Mg-C +2,12%, Mn-C –3,89%, Cu-C –9,17%); число эритроцитов возрастает при нагрузке Mg-C на 47,4% ($p \leq 0,01$) и при нагрузке Mn-C на 16,9% ($p \leq 0,01$). Число лейкоцитов при нагрузке Cu-C повышается на 15,1% ($p \leq 0,05$), что свидетельствует о мягком стимулирующем действии Mg-C и Mn-C и мобилизационном характере адаптации к Cu-C. Во всех опытных группах снижается содержание натрия на 8,1–26,9% и ртути на 21,6–29,8% при накоплении в группе Cu-C алюминия на 141,8% ($p \leq 0,001$) и свинца на 30,6% ($p \leq 0,01$). Масса *Planorbis planorbis* достоверно снижается только при нагрузке Mg-C – на 25,2% и 33,3% на 4-й и 8-й неделях ($p \leq 0,05$), при этом во всех группах отмечено накопление кальция на 15,6–234,3% и снижение алюминия на 46,9–62,8% ($p \leq 0,001$). Выживаемость *Daphnia magna* снижается до 20,5% (Mg-C), 9,1% (Mn-C, $p < 0,01$) и 24,4% (Cu-C) при неизменном суммарном приплоде (34–35 особей), что указывает на избирательное действие на выживаемость при сохранной плодовитости с рядом токсичности Mn-C > Mg-C $\geq$ Cu-C > Контроль. Удельная скорость роста *Lemna minor* во всех опытных группах становится отрицательной (–0,004...–0,01 сут^{–1} против 0,02 сут^{–1} в контроле). Устойчивость организмов к нанокмполитной нагрузке убывает в ряду *Cyprinus carpio* > *Planorbis planorbis* > *Lemna minor* > *Daphnia magna*.

4. Действие исследуемых факторов на фотосинтезирующие процессы определяется природой металла. Достоверное угнетение пигментного аппарата *Lemna minor* относительно контроля установлено только при нагрузке Cu-C отмечено снижение хлорофилла А на 26,5% ($p \leq 0,05$), хлорофилла В на 44,7% ($p \leq 0,01$) и каротиноидов на 27,6% ($p \leq 0,05$), что относительно исходных значений составляет 54,0; 59,6 и 54,0% и сопровождается хлорозом листочков и уменьшением размера лопастей вследствие медь-индуцированного окислительного стресса. При нагрузке Mg-C и Mn-C пигментный комплекс превосходит контроль по содержанию хлорофилла А на 37,9 и 18,3%, каротиноидов на 33,9 и 13,4%, что обусловлено ролью магния как центрального атома молекулы хлорофилла и марганца как кофактора

кислород-выделяющего комплекса фотосистемы II, тогда как прооксидантные свойства меди вызывают деструкцию фотосинтетического аппарата.

5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Для сохранения устойчивости пресноводной экосистемы и обеспечения экологической безопасности ихтиофауны водоемов, содержание нанокompозитов магния, марганца и меди не должно превышать 0,2 мг/кг корма, это позволит повысить интенсивность роста при 100 %-ной сохранности рыбы и снизить содержание токсических элементов с 0,18 ммоль/кг до 0,16 ммоль/кг в частности содержания кадмия в мышечной ткани на 90,0–98,9%. Повышение дозировки до 0,4 мг/кг корма не рекомендуется, так как нет дополнительного продукционного эффекта и в то же время сопровождается накоплением Pb и Al в мышечной ткани.

При экологической экспертизе кормовых препаратов на основе наноразмерных форм металлов предлагается включать в схему испытаний оценку выживаемости *Daphnia magna* и содержания фотосинтетических пигментов *Lemna minor* как наиболее чувствительных индикаторов нанокompозитной нагрузки.

6 ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Направление диссертационной работы открывает возможности для дальнейших исследований:

1. по оценке влияния углеродных нанокompозитов на микробиоценоз кишечника рыб и водной среды с установлением взаимосвязи между составом микробиома и пулом химических элементов в организме гидробионтов;
2. изучения механизмов трансформации, миграции и биодоступности металл-углеродных нанокompозитов в водной среде, определяющих различия в токсичности наноразмерных и ионных форм металлов;
3. установления характера отклика экосистемы при хронической и многопоколенной экспозиции, а также при более широком диапазоне дозировок нанокompозитов;
4. оценки трофического переноса и биоаккумуляции компонентов нанокompозитов по пищевой цепи «продуцент – консумент – рыба» с расчётом баланса экосистемы;
5. формирования новых подходов к экологическому нормированию наноразмерных форм металлов в водных объектах рыбохозяйственного значения и к экологической экспертизе кормовых препаратов на их основе в условиях УЗВ и тепловодных хозяйств России.

7 СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ

1. Буланин, Д.И. Экологическая оценка воздействия нанокompозита Cu-C на элементный статус и микробиом кишечника карпа (*Cyprinus carpio*) / Д.И. Буланин, Е.П. Мирошникова, М.С. Мингазова, Ю.В. Килякова, А.Е. Аринжанов // Экология урбанизированных территорий. – 2026 – №2. - С. 6-14.
2. Мирошникова, Е.П. Экологическая оценка поступления нанокompозитов меди, магния и марганца в водную экосистему / Е.П. Мирошникова, Д.И. Буланин,

Свидетельства о государственной регистрации баз данных

3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623431 РФ. База данных гематологических показателей карпа на фоне ультрадисперсных частиц марганца на углеродной матрице: № 2026623203: опубл. 15.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е. П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623457 РФ. Влияние ультрадисперсных частиц магния на углеродной матрице на содержание макро- и микроэлементов в мышечной ткани карпа: № 2026623195: опубл. 16.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623516 РФ. Влияние ультрадисперсных частиц марганца на углеродной матрице на содержание макро- и микроэлементов в мышечной ткани карпа: № 2026623208: опубл. 20.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

6. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623289 РФ. Влияние ультрадисперсных частиц марганца на углеродной матрице на содержание химических элементов в мышечной ткани карпа: № 2026623214: опубл. 13.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623522 РФ. Влияние ультрадисперсных частиц марганца на углеродной матрице на физиологическое состояние карпа: № 2026623198: опубл. 20.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623521 РФ. Влияние ультрадисперсных частиц меди на углеродной матрице на содержание химических элементов в мышечной ткани *Cyprinus carpio*: № 2026623197: опубл. 20.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623484 РФ. Гематологические показатели карпа при включении в рацион ультрадисперсных частиц магния на углеродной матрице: № 2026623213: опубл. 17.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623485 РФ. Концентрация химических элементов в мышечной ткани карпа под влиянием

ультрадисперсных частиц магния на углеродной матрице: № 2026623210: опубл. 17.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623483 РФ. Концентрация химических элементов в мышечной ткани карпа под влиянием ультрадисперсных частиц меди на углеродной матрице: № 2026623209: опубл. 17.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026623397 РФ. Морфо-биохимические показатели карпа при включении в рацион ультрадисперсных частиц магния на углеродной матрице: № 2026623199: опубл. 14.07.2026 / А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко».

Прочие публикации

13. Мингазова М.С. Действие нанокompозита марганца на организм карпа / М.С. Мингазова, Ю.В. Килякова, Е.П. Мирошникова, **Д.И. Буланин**, А.Е. Аринжанов // Достижения науки и техники АПК, 2025. - Т. 39, № 8. - С. 96-102.

14. **Буланин, Д.И.** Рост и гематологические параметры карпа при использовании в кормлении нанокompозита Cu-C / Д.И. Буланин, М.С. Мингазова, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, А.Е. Аринжанов // Животноводство и кормопроизводство, 2025. - Т. 108, № 3. - С. 235-246.

15. **Буланин, Д.И.** Влияние нанокompозита CU-C на живую массу карпа / Д.И. Буланин, Е.П. Мирошникова, М.С. Мингазова, А.Е. Аринжанов, Ю.В. Килякова // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 70-летию Оренбургского государственного университета, Оренбург, 30 января - 1 февраля 2025 г. – Оренбург. – Оренбургский государственный университет, 2025. - С. 3865-3867.

16. Килякова Ю.В. Биологические эффекты нанокompозита марганца при воздействии на организм карпа / Ю.В. Килякова, М.С. Мингазова, Е.П. Мирошникова, А.Е. Аринжанов, **Д.И. Буланин** // Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии: материалы Международной научно-практической конференции, Оренбург, 25 июня 2026 г. – Оренбургский государственный университет им. В. А. Бондаренко, 2026. - С. 199-202.

Подписано в печать 28.09.2026 г.

Формат 60×90/16. Объем – 1,0 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии Цифра

460018, г. Оренбург, пр. Победы, 11, тел. +7 (3532) 45-46-47