

На правах рукописи



Маленкина Ксения Александровна

Структурно-функциональная организация пресноводной экосистемы в условиях поступления в среду наночастиц железа и веществ анти кворума

1.5.15. Экология (биологические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой 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, доцент
Аринжанов Азамат Ерсайнович

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 13 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/266>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аринжанов Азамат Ерсайнович

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Бурное развитие нанотехнологий сопровождается беспрецедентным наращиванием производства наноматериалов, превышающее 100 тыс. тонн в год. Причем, наноматериалы наряду с высокотехнологичными отраслями широко применяются в сельскохозяйственном производстве, в том числе в птицеводстве (Сизова Е.А., 2017), скотоводстве (Han L. et al., 2021), свиноводстве (Cui Y, et al., 2021) и аквакультуре (Аринжанов А.Е., 2026). Как следует из накопленных наукой данных, уникальные свойства наноматериалов при использовании в животноводстве позволяют обеспечить дополнительный рост продуктивности животных и повысить эффективность использований кормов, что сопровождается повышением экономической эффективности отрасли (Мирошников С.А., Сизова Е.А., 2017).

Наряду с наноматериалами в последнее десятилетие в животноводстве нашли применение и специфические соединения, способные подавлять развитие зоопатогенной микрофлоры. К их числу относятся ингибиторы *Quorum sensing*. Последние, в силу способности нарушать коммуникации между микроорганизмами, представляются крайне перспективными для преодоления антибиотикорезистентности патогенов. Это определило применение ингибиторов *Quorum sensing* в птицеводстве (Климова Т.А., 2024), скотоводстве (Атландерова К.Н., 2019) и аквакультуре (Аринжанов А. Е., 2026).

Практика применения новых веществ в сельском хозяйстве в общем, и в аквакультуре в особенности, равно как и в других отраслях человеческой деятельности, неминуемо сопровождается попаданием последних в водные экосистемы. Это формирует новый запрос на детальное изучение возможных последствий для биосистем.

Степень разработанности темы. Наука накопила достаточно противоречивые данные о возможных последствиях попадания наноматериалов в водные биосистемы. С одной стороны существуют свидетельства о крайне высокой реакционной способности наноматериалов, с проникновением последних в водные организмы и с далеко идущими негативными последствиями для биосистем. При этом действие наночастиц распространяется на активность ферментов, интенсивность фотосинтеза, процессы клеточного дыхания, структуру микробиоценозов и характер межвидовых взаимодействий в водных биосистемах (Ren Zh. et al., 2024; Huang X. et al., 2024). Есть свидетельства о не способности существующих технологий обеспечить необходимую очистку сточных вод от техногенных наночастиц, в частности церия, с закономерным попаданием наночастиц этого металла в водные экосистемы и питьевую воду (Limbach L.K., et.al. 2008). На ряду с этим существует большой объем данных об отсутствии негативного действия наноматериалов на водные биосистемы, перспективности применения их для очистки вод, ремедиации загрязненных почв, удалении тяжелых металлов, органических загрязнителей и антибиотиков (Yan et al., 2013; Pasinszki and Krebsz, 2020).

Знания о влиянии ингибиторов *Quorum sensing* на водные биосистемы куда более скромные. Эти вещества в отличии от традиционных антимикробных препаратов, не уничтожают микроорганизмы, а нарушают их коммуникацию. Поэтому подавление кворум-чувствительности сегодня рассматривают как более экологичный подход по сравнению с использованием антибиотиков и агрессивных дезинфицирующих средств (Qu Y. et al., 2024; Hu C. et al., 2024). В то же время известно о селективных изменениях в биосистемах пресных водоемов под влиянием ингибиторов *Quorum sensing*, связанных с жизнедеятельностью водорослей и развитием цианобактерий, процессов колонизации и

устойчивости микробных сообществ (Vajagathali M., Jesu A., 2024).

Анализ результатов исследований по проблеме позволил констатировать, что современные технологии производства объектов аквакультуры с применением наноматериалов и ингибиторов *Quorum sensing* пока не получили необходимую оценку по влиянию на пресноводные экосистемы.

Цель и задачи исследования. Целью работы является изучение влияния наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* на биосистему «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*» с исследованием таксономической структуры кишечной микробиоты и адаптационных механизмов организмов пресноводной экосистемы.

При этом решались следующие задачи:

1. Дать оценку адаптационным изменениям в биосистеме «микробиом кишечника - организм хозяина *Cyprinus carpio*» к присутствию в корме рыбы наночастиц железа.
2. Дать оценку адаптационным изменениям в биосистеме «микробиом кишечника - организм хозяина *Cyprinus carpio*» к присутствию в корме рыбы ингибитора *Quorum sensing*.
3. Дать оценку общего состояния пресноводной экосистемы, с оценкой *Cyprinus carpio*, *Anodonta cygnea*, *Lemna minor* и *Daphnia magna* в условиях поступления наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing*.
4. Изучить действие исследуемых факторов на фотосинтезирующие процессы в экосистеме на модели ряски малой (*Lemna minor*).

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в изучении совместного воздействия наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* на пресноводную экосистему.

Впервые установлено, что адаптация биосистемы «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*» на фоне поступления с кормом наночастиц железа и вещества-ингибитора кворум-сенсинг умбеллиферона сопровождается изменениями таксономического состава микрофлоры кишечника с последующими селективными перестройками элементного статуса рыбы. Показана зависимость обменного пула макро- и микроэлементов организма *Cyprinus carpio* от таксономической структуры кишечного микробиома. Установлено, что снижение относительного содержания представителей рода *Cetobacterium* и семейства *Fusobacteriaceae* сопровождается перестройкой обмена железа, кальция и натрия; увеличение численности представителей *Desulfovibrionaceae* ассоциировано с повышением содержания железа; изменение относительной численности *Sphingomonadaceae* и *Rubritaleaceae* связано с перераспределением кальция и формированием новых микробных ниш; изменение представленности родов *Shewanella*, *Aeromonas*, *Vibrio*, *Citrobacter*, *Emticicia* и *Niveispirillum* отражает направленную перестройку элементного статуса организма карпа и процессов минерального обмена.

Получены новые для науки данные, демонстрирующие, что поступление наночастиц железа сопровождается селективной перестройкой кишечного микробиома *Cyprinus carpio* без существенного изменения α -разнообразия, но с выраженной трансформацией β -разнообразия и таксономической структуры сообщества. Под действием наночастиц железа снижается представленность доминирующего симбиотического рода *Cetobacterium*, изменяется относительное содержание представителей *Shewanella*, *Vibrio*, *Aeromonas* и *Niveispirillum*, возрастает представленность *Pseudomonadaceae*, *Tolomonas* и *Pseudomonas*, изменяется состав

уникальных таксонов микробного сообщества, что свидетельствует о формировании нового устойчивого варианта кишечного микробиоценоза, ассоциированного с перестройкой процессов минерального обмена организма хозяина.

Получены новые для науки данные, демонстрирующие, что введение ингибитора кворум-сенсинга – умбеллиферона – вызывает направленную трансформацию кишечного микробиома *Cyprinus carpio*, сопровождающуюся увеличением β -разнообразия при сохранении показателей α -разнообразия. Наиболее выраженные изменения связаны с перераспределением относительного содержания представителей *Citrobacter*, *Shewanella*, *Aeromonas*, *Cetobacterium*, *Emticicia* и *Niveispirillum*, снижением доминирования *Fusobacteriota* и перераспределением долей *Pseudomonadota* и *Bacteroidota*, что сопровождается последующей перестройкой обмена макро- и микроэлементов организма рыб.

Получены новые для науки данные, демонстрирующие, что совместное применение наночастиц железа и ингибитора кворум-сенсинга оказывает комплексное воздействие на биосистему «микробиом кишечника – организм хозяина». Установлено, что сочетанное действие исследуемых факторов сопровождается последовательной сменой доминирующих таксонов кишечного микробиома, снижением относительного содержания *Fusobacteriaceae* и *Cetobacterium*, увеличением представленности *Desulfovibrionaceae*, *Sphingomonadaceae*, *Rubritaleaceae* и других таксонов, ростом β -разнообразия микробного сообщества и формированием новых микробных ниш. Выявленные изменения сопровождаются взаимосвязанной перестройкой элементного статуса организма, затрагивающей обмен железа, кальция, натрия, калия, цинка, меди, кобальта и никеля, что позволило впервые обосновать существование единой функциональной оси «наночастицы железа – ингибитор кворум-сенсинга – кишечный микробиом – элементный статус организма хозяина».

Теоретическая значимость работы состоит в разработке рабочей гипотезы с последующей проверкой, раскрывающей механизм воздействия наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* в корме рыбы на биосистему «микробиом кишечника – организм хозяина *Cyprinus carpio*».

Теоретически обосновано и показано в эксперименте опосредованное действие наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* – умбеллиферона на элементный статус *Cyprinus carpio* через трансформацию видового состава микрофлоры кишечника рыбы.

Исследование расширяет представления о механизмах устойчивости пресноводных экосистем, с акцентом на устойчивость, зависящую от состояния микробной коммуникации и её химического регулирования. Это позволяет скорректировать современные модели экосистемной стабильности, включая роль микробных кооперативных взаимодействий.

Работа вносит вклад в теорию микробной экологии, подавление кворум-сенсинга позволяет увидеть влияние поведенческих реакций бактерий на формирование структуры микробиома, что является важным элементом экосистемы.

Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности применения наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* в качестве средств направленной регуляции системы «микробиом кишечника – организм хозяина» без выраженного нарушения естественных экологических процессов. Полученные результаты могут служить научной основой для разработки технологий экологического сопровождения аквакультуры, направленных на поддержание физиологического

состояния гидробионтов посредством управления микробными взаимодействиями без их подавления.

Установленные закономерности изменения кишечного микробиома и элементного состава расширяют возможности использования микробиологических показателей в качестве чувствительных биоиндикаторов оценки состояния гидробионтов и качества водной среды, что позволяет применять их при экологическом мониторинге пресноводных экосистем и оценке эффективности природоохранных мероприятий.

Практическая ценность работы также определяется использованием соединений, близких к естественным компонентам природной среды. Железо является неотъемлемым участником биогеохимического круговорота элементов, а умбеллиферон представляет собой природный растительный метаболит, обладающий антивирулентным действием без выраженного бактерицидного эффекта. При соблюдении физиологически обоснованных концентраций это создает предпосылки для применения данных соединений в экологических технологиях, ориентированных на сохранение микробного разнообразия, снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы и поддержание их устойчивого функционирования.

Методология и методы исследования. В процессе эксперимента применялись стандартные экологические, физиологические и биохимические методы исследования с применением научно-методической базы кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» с использованием материально-технической базы Центра коллективного пользования Института микро- и нанотехнологий Оренбургского государственного университета имени В.А. Бондаренко <http://www.osu.ru/doc/1328>, ФГБНУ «ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН» <https://икп-бст.пф/>, «Персистенция микроорганизмов» ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН» <https://ikvs.info/institut/laboratorii/czkp>.

Полученные результаты были обработаны с помощью программного пакета «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США).

Основные положения, выносимые на защиту:

- пресноводная экосистема реагирует на введение наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* - умбеллиферона в корм карпа адаптационными реакциями отдельных элементов биосистемы водоема *Anodonta cygnea*, *Lemna minor*, *Daphnia magna*;

- адаптация биосистемы «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*» на фоне поступления с кормом наночастиц железа и ингибитора *Quorum sensing* - умбеллиферона сопровождается изменениями таксономического состава микрофлоры кишечника с последующими селективными и зависимыми перестройками элементного статуса рыбы.

Благодарности. Работа выполнялась в соответствии с госбюджетной НИР ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» (2023-2026 годы № 12210110049-1), при финансовой поддержке гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№ 075-15-2024-550), гранта РНФ №23-76-10054.

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 с использованием программного пакета Statistica 10.0.

Выводы и предложения основаны на научных исследованиях, проведенных с использованием современных методов анализа и расчета. Основные материалы диссертационной работы доложены на расширенном заседании кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры ОГУ.

По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, 1 патент на изобретение и 10 баз данных зарегистрированных в Роспатенте.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 181 страницах компьютерной верстки, состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием материалов и методов исследований, главы собственных исследований, обсуждения полученных результатов, выводов, предложений производству и перспектив дальнейшей разработки. Работа содержит 34 таблицы, 28 рисунков и приложений. Список использованной литературы включает 199 источников, в том числе 131 зарубежных авторов.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования в составе пресноводной экосистемы

Объекты исследований: карп обыкновенный (*Cyprinus carpio*), беззубка обыкновенная (*Anodonta cygnea*), ряска малая (*Lemna minor*), дафния большая (*Daphnia magna*).

2.2 Исследуемые препараты. Наночастицы железа (НЧ Fe), внедренные в углеродную матрицу (40–60 нм, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН). Для введения НЧ в корм карпа применялся метод напыления корма предварительно диспергированным в физиологическом растворе комплексом НЧ ультразвуковым диспергатором УЗДН-2Т (производитель NPP Academprigor, Россия) в течение 30 минут. Умбеллиферон (C₉H₆O₃, молекулярная масса 162,14 г/моль, чистота 98%, CAS RN 93-35-6, производитель Tokyo Chemical Industry Co., LTD).

2.3 Схема проведения исследования. Проведено 2 этапа исследований. Первый этап исследований включал создание стабильного аквабиоценоза в искусственной водной экосистеме, в аквариумы помещали сеголетков *Cyprinus carpio* массой 30-35 г (n=10). В рамках I эксперимента данного этапа рыбы получали НЧ Fe: в I опытной группе в дозировке - 0,8 мг/кг; во II - 2,0 мг/кг. Во II эксперименте использовали ингибитор кворум-сенсинга бактерий – умбеллиферон (QSI), в I опытной группе в дозировке - 1,0 мг/кг корма, во II - 2,0 мг/кг, в III - 3,0 мг/кг. В III эксперименте использовали комплекс НЧ и ингибиторов кворум-сенсинга: корм I опытной группы обогащали НЧ Fe в дозировке - 0,8 мг/кг и QSI - 1 мг/кг; во II опытной НЧ Fe - 0,8 мг/кг в сочетании с QSI в концентрации 2 мг/кг; в III НЧ Fe - 0,8 мг/кг, а дозировка QSI увеличивалась до 3 мг/кг.

На втором этапе исследований формировали более сложную аллохтонную водную экосистему из карпа обыкновенного *Cyprinus carpio* (n=50/аквариум), беззубки обыкновенной *Anodonta cygnea* (n=7/аквариум), ряски малой *Lemna minor* (n=100/аквариум), дафнии большой *Daphnia magna* (n=10/аквариум). Опытные группы дополнительно в составе корма получали НЧ Fe: в I опытной группе в дозировке - 0,8 г/кг; во II - QSI 1,0 мг/кг корма; III опытной совместно НЧ Fe – 0,8 мг/кг корма и QSI - 1,0 мг/кг корма.

2.4. Оборудование и технические средства

Анализ морфо-биохимических показателей крови проводили с помощью автоматического гематологического анализатора «URIT-2900 Vet Plus» и автоматического биохимического анализатора «DIRUI CS-T240» в Испытательном центре ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН», г. Оренбург. Анализ элементного состава мышечной ткани рыб проведен с использованием атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии в лаборатории Испытательного центра ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН» г. Оренбург. Для контроля живой массы рыбы применяли весы ВАТ 1. Для определения биологического разнообразия микробиома исследовали образцы содержимого кишечника карпа по средству выделения ДНК с использованием набор реагентов FastDNA® Spin Kit for Feces. Секвенирование образцов выполнено в ЦКП «Персистенция микроорганизмов» Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН, г. Оренбург.

В рамках исследования *Lemna minor* в модельном эксперименте было проведено исследование выживаемости и физиологического состояния водных растений. Визуальная оценка растений выполнялась с учетом рекомендаций И.Ю. Домницкого, (2016); А.С. Ольковой (2017); Л. Н. Никифорова (2021); А. Локтевой, (2023); А.Г. Сысы (2025). Контроль состояния растений фиксировали ежедневно. Определение содержания фотосинтезирующих пигментов *Lemna minor* проходило спектрофотометрическим методом.

2.5 Статистическая обработка материала

Статистический анализ проведен путем сравнения опытных групп с контролем с использованием пакета программ «Excel» («Microsoft», США) и «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Значение с $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ и $P \leq 0,001$ считается статистически значимым. Коэффициенты корреляции рассчитывались по Спирмену.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Результаты I эксперимента первого этапа исследований по оценке биологической системы «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*»

Адаптация *Cyprinus carpio*. Результаты показали, что организм рыб хорошо адаптировался к присутствию в корме НЧ Fe. Так, введение НЧ Fe в дозировке 0,8 мг/кг корма сопровождалось увеличением живой массы рыбы на 13,3% ($P \leq 0,05$) в сравнении с контрольной группой. В то же время увеличение дозировки НЧ Fe до 2 мг/кг корма не сопровождалось достоверным изменением живой массы рыбы.

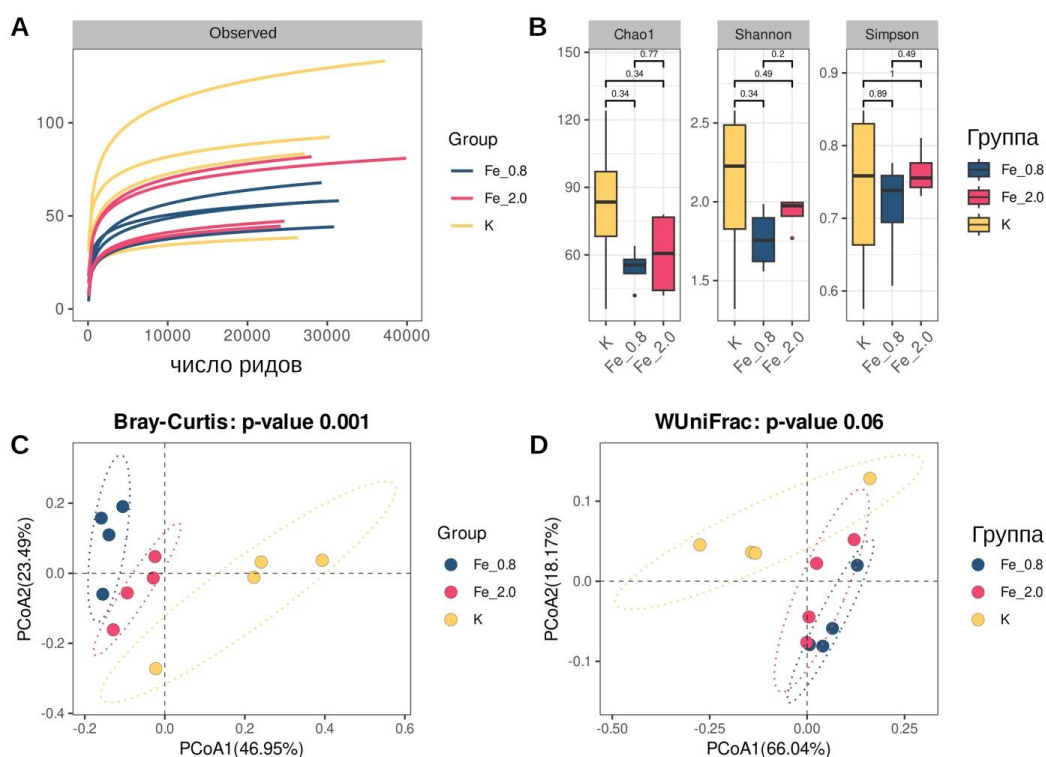
В ходе исследований установлено повышение целого ряда морфологических параметров крови в опытной группах: уровня эритроцитов на 16,9% ($P \leq 0,05$), гемоглобина - 9,9% ($P \leq 0,01$), гематокрита - на 20,1% ($P \leq 0,05$) и тромбоцитов на 26,3% ($P \leq 0,05$) в крови карпа II опытной группы. В I опытной группы зафиксировано повышение содержания тромбоцитов на 29,6% ($P \leq 0,05$) и снижение содержания лейкоцитов крови на 10,1% ($P \leq 0,05$). Индекс распределения эритроцитов, показывающий количество атипичных клеток, показал повышение у рыб I опытной группы в сравнении с контролем на 21,2% ($P \leq 0,05$). Так, в I опытной группе нами было выявлено снижение уровня креатинина - на 62,5% ($P \leq 0,001$). В II опытной группе отметили повышение уровня железа на 43,5% ($P \leq 0,01$).

Адаптация организма карпа к действию НЧ сопровождалась изменениями в минеральном обмене. Нами зафиксировано повышения уровня макроэлементов, эссенциальных и токсических во всех опытных группах.

$$\text{ЭП (I)} = \frac{\uparrow \text{Na, Mn, Co, Fe, Ni, Br, Mo, I, Cr, Li, Al, Sn, Ba}}{\downarrow \text{Ag}}$$

$$\text{ЭП (II)} = \frac{\uparrow \text{Na, Fe, I, Cr, Ba}}{\downarrow \text{Ag}}$$

Микробиом кишечника *Cyprinus carpio*. Кривые разрежения для всех образцов достигли плато (рисунок 1А), что указывает на то, что прокариотические сообщества во всех изученных группах были проанализированы практически полностью. Индекс богатства Чао 1 для образцов К (контроль), Fe 0.8 (I опытная) и Fe 2.0 (II опытная) составил 82, 54,25 и 60,5 соответственно. Индекс разнообразия Шеннона составил 6,08 для группы К, 6,24 для группы Fe 0.8 и 5,72 для группы Fe 2.0. Индекс Джини-Симпсона составил 0,73 для группы К, 0,71 для группы Fe 0.8 и 0,76 для группы Fe 2.0. Мы не обнаружили достоверных различий (Wilcoxon rank-sum test, $p \leq 0,05$) в индексах разнообразия (рисунок 1В).



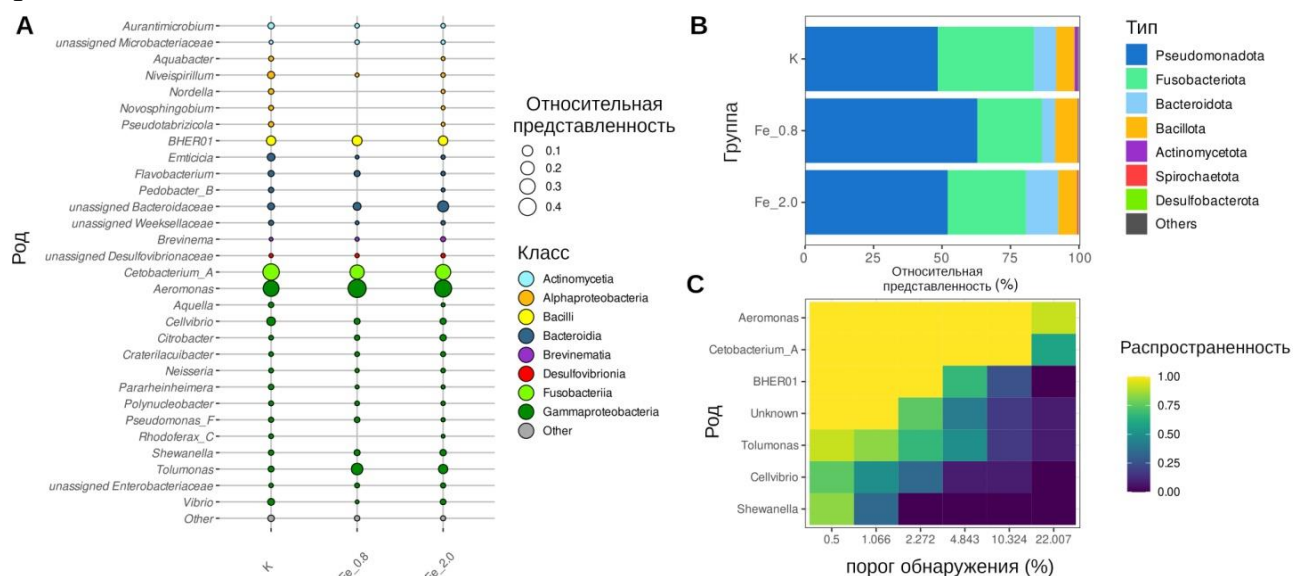
А - Зависимость наблюдаемых ASV от глубины секвенирования. В - Индексы альфа-разнообразия Чао 1, Шеннона и Джини-Симпсона. С-D - Результаты анализа главных координат (PCoA) прокариотических сообществ с использованием расстояний Брея-Кертиса (С) и взвешенных расстояний UniFrac (D) соответственно.

Рисунок 1 – Альфа- и бета-разнообразие микробиомов кишечника карпа *Cyprinus carpio*

Анализ PERMANOVA на основе дистанции Брея-Кертиса и взвешенных расстояния UniFrac показал, что на диаграммах ординации, построенных методом

главных компонент на основе дистанций Брея-Кертиса (рисунок 1C) и взвешенной дистанции UniFrac (рисунок 1D), образцы группируются в отдельные кластеры. Было обнаружено, что бета-разнообразие на основе дистанции Брея-Кертиса достоверно отличается в исследуемых группах (PERMANOVA; $F = 4,32$, $R^2 = 0,49$, $p = 0,005$), однако не отличается на основе взвешенных расстояний UniFrac (PERMANOVA; $F = 2,48$, $R^2 = 0,36$, $p = 0,06$).

Представители фил *Pseudomonadota*, *Fusobacteriota*, *Bacteroidota*, *Bacillota*, и *Actinomycetota* доминировали во всех образцах (рисунок 2B). Доля других фил не превышала 1% в сообществах.



А - Роды/классы прокариот в микробных сообществах; В - Филы бактерий в микробных сообществах; С - Основной микробиом, представленный на уровне рода.

Рисунок 2 – Таксономическая структура микробиома кишечника карпа *Cyprinus carpio*

Биосистема «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*»: зависимость элементного статуса рыбы от видового состава микробиома кишечника. Корреляционный анализ показал, что элементный состав мышечной ткани тесно связан с конфигурацией кишечного микробиома, причём наиболее выраженные ассоциации формируют бактерии микробиома, выступающие регуляторами усвоения элементов, перераспределения и удержания в организме.

Род *Shewanella* ассоциировался преимущественно с повышением Mg, Zn, Na, Pb и частично Fe, тогда как *Vibrio* - со снижением Fe, Mg, Zn, Na, Se, I, Co, Cr, Li и Al. Род *Niveispirillum* также демонстрировал выраженный отрицательный профиль по Mg, Fe, Zn, Pb и Na, а *Aeromonas* - положительную сопряжённость с Mg, I, Na, Fe и рядом микроэлементов. Напротив, *Cetobacterium*, *Culicoidibacter* и *Flavobacterium* менее информативную картину. В совокупности это позволяет рассматривать *Vibrio*, *Shewanella*, *Niveispirillum* и *Aeromonas* как наиболее информативные индикаторные таксоны, отражающие перестройку системы «микробиом–минеральный обмен» у карпа (рисунок 3).

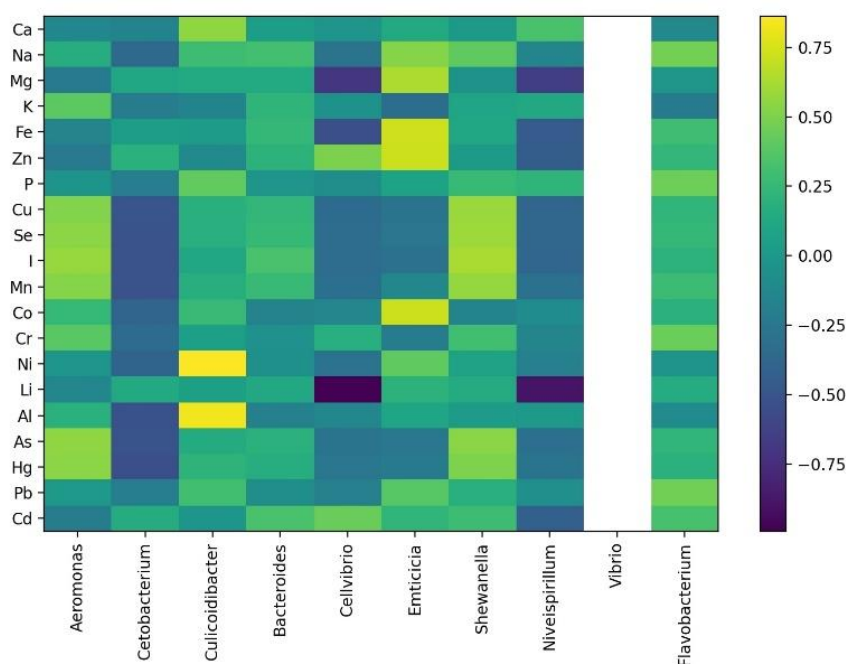


Рисунок 3 - Корреляции между родами микробиома и дополнительными элементами мышечной ткани

3.2 Результаты II эксперимента первого этапа исследований по оценке биологической системы «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*».

Адаптация *Cyprinus carpio*. Сохранность рыб во всех сравниваемых группах была равна 100 %. Оценка адаптации организма *Cyprinus carpio* к действию оцениваемого фактора выявила некоторые изменения в картине крови рыбы. В частности, уровень эритроцитов в крови карпа I опытной группы повысился на 56% ($P \leq 0,05$) относительно контрольной группы, уровень гематокрита – на 37,6% ($P \leq 0,01$). Содержание гемоглобина в III опытной группе было ниже, чем в контрольной группе на 8,4% ($P \leq 0,05$), уровень гематокрита – на 27,1% ($P \leq 0,01$), в сравнении с контролем. Морфологические показатели крови карпа при поступлении умбеллиферона находились в пределах физиологической нормы.

Анализ биохимических показателей крови показал снижение содержания альбумина в I опытной группе на 34,7% ($P \leq 0,01$). Уровень билирубина в III опытной группе был достоверно ниже на 46,4% ($P \leq 0,001$), относительно контроля. Снижение содержания мочевой кислоты было зафиксировано в I группе на 21,5% ($P \leq 0,05$) и во II - на 21,5% ($P \leq 0,01$). Повышение содержания железа в сыворотке крови карпа зафиксировано на 26,7% ($P \leq 0,05$) в III группе, а также и кальция - на 55,6% ($P \leq 0,01$) в I группе и на 44,5% ($P \leq 0,05$) и III группе, в сравнении с контролем.

Адаптация организма карпа к действию умбеллиферона сопровождалась изменениями в минеральном обмене. Достоверные различия в опытных группах относительно контроля сформированы в элементный профиль (ЭП):

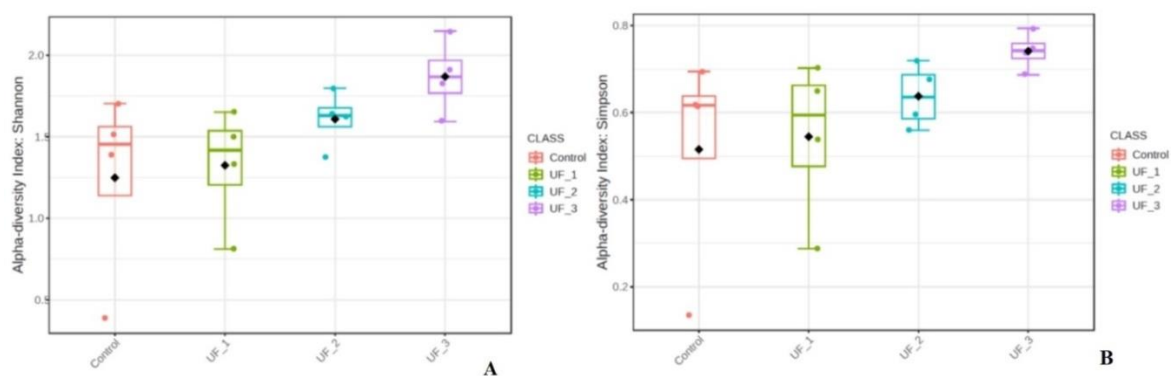
$$\text{ЭП (I)} = \frac{\uparrow \text{Ca, Na, Cu, Fe, Zn, Sr, Ag, Cd}}{\quad}$$

$$\text{ЭП (II)} = \frac{\uparrow \text{Ca, Na, Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Sr, Ag, Cd, Hg}}{\quad}$$

$$\text{ЭП (III)} = \frac{\uparrow \text{Ca, Na, Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Sr, Ag, Cd, Ba}}{\quad}$$

Исследование совокупности химических элементов в тканях карпа показало, что содержание макро- и микроэлементов, а также токсических элементов в опытных группах повышается в сравнении с контролем.

Микробиом кишечника *Cyprinus carpio*. Анализ альфа-разнообразия показал, что индекс Шеннона существенно не изменился в опытных группах по сравнению с контролем. Увеличение индекса Шеннона до 1,59-2,15 и индекса Симпсона до 0,69-0,79 наблюдалось в III группе (в контроле индекс Шеннона – 0,38-1,70, индекс Симпсона – 0,13-0,69) (рисунок 4). Анализ бета-разнообразия кишечной микробиоты карпа не показал статистически значимых различий между образцами кишечной микробиоты и образцами опытных групп рыб.



А - Индекс Шеннона; **В** - Индекс Симпсона.

Рисунок 4 – Анализ альфа-разнообразия (**Control** – контрольная группа; опытные группы **UF_1**, **UF_2**, **UF_3** – добавка умбеллиферона в концентрациях 1, 2 и 3 мг/кг корма, соответственно).

На уровне родов в I группе существенно возросла доля неклассифицированных представителей *Desulfovibrionaceae* до 1,09–85,30% (0–2,43% в контроле), *Legionella* до 0–0,27% (0–0,005% в контроле) (рисунок 5).

Снизилась доля *Cetobacterium* до 4,04–67,66% (46,50–94,74% в контроле), *Aeromonas* до 6,77–13,20% (3,19–34,05% в контроле) и неклассифицированных представителей MB19 до 0,05–0,22% (0,31–0,65% в контроле). Исчез род *Emticicia* (0–6,30% в контроле). Во II группе существенных изменений не отмечено, за исключением увеличения доли рода *Shewanella* до 1,01–1,66% (0,05–0,71% в контроле). Кроме того, исчез род *Emticicia* (0–6,30% в контроле). В III опытной группе значительно возросла доля *Brevinema* до 0,68–42,45% (0,01–8,95% в контроле), неклассифицированных представителей *Desulfovibrionaceae* до 13,23–45,57% (0–2,43% в контроле), *Legionella* до 0,01–0,31% (0–0,005% в контроле), *Niveispirillum* до 0,02–4,94% (0–0,01% в контроле), *Flavobacterium* до 0,53–2,66% (0,01–0,58% в контроле). Снизилась доля *Cetobacterium* до 5,89–41,86% (46,5–94,74% в контроле) и *Culicoidibacter* до 0,41–3,36% (1,38–8,% в контроле). Появились отсутствующие в контроле *Azospirillum* в доле до 0–6,25% и *Sphingomonas* до 0–1,21%.



Рисунок 5 – Таксономический состав микробиоты на уровне родов (**Control** – контрольная группа; опытные группы **UF_1**, **UF_2**, **UF_3** – добавка умбеллиферона в концентрациях 1, 2 и 3 мг/кг корма, соответственно).

Биосистема «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*»: зависимость элементного статуса рыбы от видового состава микробиом кишечника. Наиболее выраженные положительные связи с эссенциальными элементами выявлены для рода *Citrobacter*: с P ($r = 0,729$), K ($r = 0,723$), Se ($r = 0,723$) и Mg ($r = 0,632$). Род *Shewanella* также продемонстрировал тесную положительную корреляцию с Ni ($r = 0,628$), Co ($r = 0,587$), Mn ($r = 0,580$), Cu ($r = 0,568$), Cr ($r = 0,540$) и Fe ($r = 0,503$), тогда как *Aeromonas* положительно коррелировал с Ni ($r = 0,577$), Cr ($r = 0,551$), Fe ($r = 0,543$), Co ($r = 0,538$) и Cu ($r = 0,528$) (риунок 6).

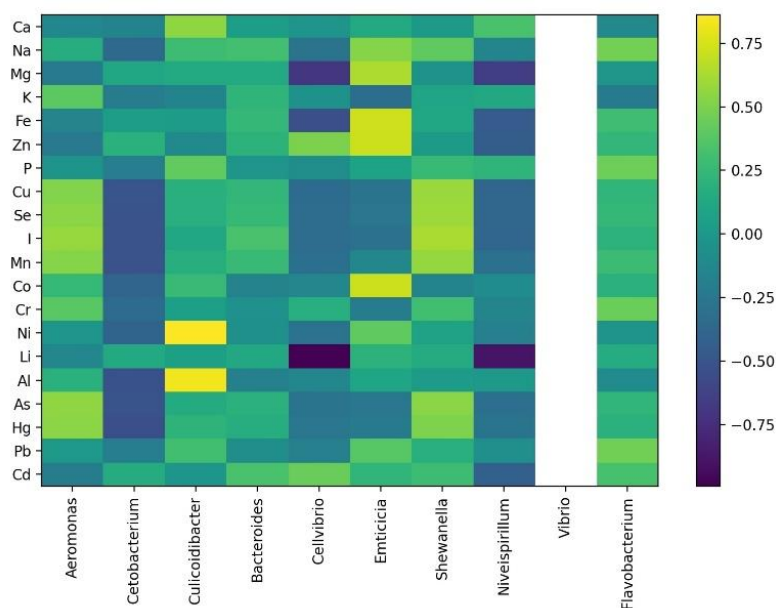


Рисунок 6 - Корреляции между родами микробиома и дополнительными элементами мышечной ткани

Напротив, *Cetobacterium* чаще встречается там, где этих элементов меньше. Для нее характерны отрицательные связи с Fe ($r = -0,537$), Pb ($r = -0,525$), Cu ($r = -0,521$), Ni ($r = -0,520$), Co ($r = -0,517$) и Cr ($r = -0,514$). Наиболее сильные отрицательные корреляции выявлены *Emticicia* по Hg ($r = -0,992$) и Mg ($r = -0,700$), а также *Niveispirillum* по Hg ($r = -0,890$), Mg ($r = -0,650$), P ($r = -0,462$) и K ($r = -0,445$).

3.3 Результаты III эксперимента первого этапа исследований по оценке биологической системы «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*»

Адаптация *Cyprinus carpio*. В рамках исследования влияния комплекса добавок из НЧ Fe и веществ анти кворум на биосистему «микробиом-организм хозяина *Cyprinus carpio*» установлен факт увеличения содержания эритроцитов в крови рыбы I группы на 110,1% ($P \leq 0,001$), относительно контроля. Уровень гемоглобина достоверно увеличен на 32,8% ($P \leq 0,001$) во II группе – на 26,3% ($P \leq 0,001$), а гематокрита – на 110,7% ($P \leq 0,001$) в I группе и на 35,1% ($P \leq 0,01$) во II группе.

Анализ биохимического профиля сыворотки крови карпа показал неоднородную динамику показателей. Так, уровень глюкозы был достоверно снижен во II опытной группе на 22,5% ($P \leq 0,01$). Содержание общего белка было выше в I группе на 12,1% ($P \leq 0,05$) выше контроля. Уровень альбумина понижался в III группе на 19,7% ($P \leq 0,05$). Показатель аланинаминотрансферазы (АЛТ) показал следующую динамику: снижение уровня фермента в I опытной группы на 14,3% ($P \leq 0,05$) и повышение в II и III опытных группах – на 17,3% ($P \leq 0,05$) и на 35,2% ($P \leq 0,01$), соответственно. Аспартатаминотрансфераза (АСТ) в значительной мере снижена в сыворотке крови особей II и III опытных групп на 48,2% ($P \leq 0,01$) и 47,2% ($P \leq 0,01$), соответственно. Уровень билирубина достоверно снижен только в I опытной группе на 63,8% ($P \leq 0,001$). Содержание холестерина было ниже контрольной группы в II группе на 32,5% ($P \leq 0,01$) и в III группе – на 55% ($P \leq 0,001$). В III группе зафиксировали снижение триглицеридов на 40,6% ($P \leq 0,05$), креатинина – на 15,1% ($P \leq 0,05$), и мочевой кислоты – на 28,1% ($P \leq 0,05$), относительно контроля.

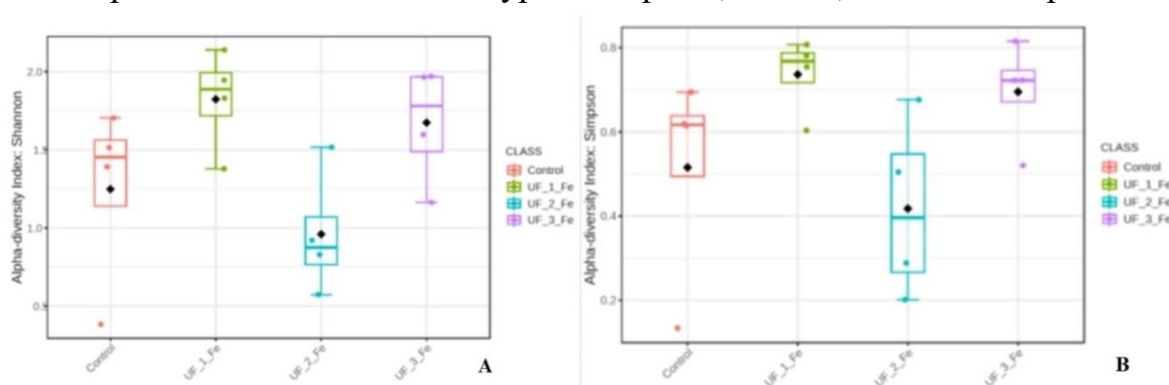
Исследуя достоверные изменения в концентрации химических элементов в опытных группах по отношению к контролю, мы сформировали элементный профиль (ЭП) этих групп:

$$\begin{aligned} \text{ЭП (I)} &= \frac{\uparrow \text{Mo, Ag, Ba}}{\downarrow \text{Hg}} \\ \text{ЭП (II)} &= \frac{\uparrow \text{Co, Sr, Ag, Ba}}{\downarrow \text{Na, Mg, K}} \\ \text{ЭП (III)} &= \frac{\uparrow \text{Sr, Ba}}{\downarrow \text{Na, K, Cu, Hg}} \end{aligned}$$

По данным III эксперимента была выявлена общая тенденция к снижению концентрации макроэлементов и токсичных элементов в опытных группах в сравнении с контролем. Одновременно, выявлена тенденция к повышению уровня эссенциальных и токсических элементов.

Микробиом кишечника *Cyprinus carpio*. Оценка действия исследуемых факторов на биосистему «микробиом-организм хозяина *Cyprinus carpio*» не выявила

существенных изменений индексов разнообразия Шеннона и Симпсона (рисунок 7) по сравнению с контролем. Добавление в рацион карпа умбеллиферона и НЧ Fe привело к существенным изменениям соотношений таксонов в микробиоте кишечника рыб на таксономических уровнях филы, класса, семейства и рода.



А - Индекс Шеннона; В - Индекс Симпсона.

Рисунок 7 – Анализ альфа-разнообразия: (**Control** – контрольная группа; опытные группы **UF_1_Fe**, **UF_2_Fe**, **UF_3_Fe** – добавка умбеллиферона в концентрациях 1, 2 и 3 мг/кг корма, соответственно, в сочетании с НЧ Fe в концентрации 0,8 мг/кг).

По сравнению с контрольной группой, в каждой из опытных групп наблюдались существенные изменения относительного обилия бактериальных фил (рисунок 8). На уровне родов в I опытной группе существенно возросла доля *Culicoidibacter* до 2,23–28,52% (1,38–8,% в контроле) и *Ephemeroptercola* до 0,09–1,20% (0–0,05% в контроле) (рисунок 8). В 3-х из 4-х образцов появились отсутствующие в контроле род *Luteolibacter* в доле 0,05–0,46% и неклассифицированный представитель *Saprospiraceae* в доле 0,01–0,27%. При этом снизилась доля *Cetobacterium* до 24,8–59,24% (46,50–94,74%).

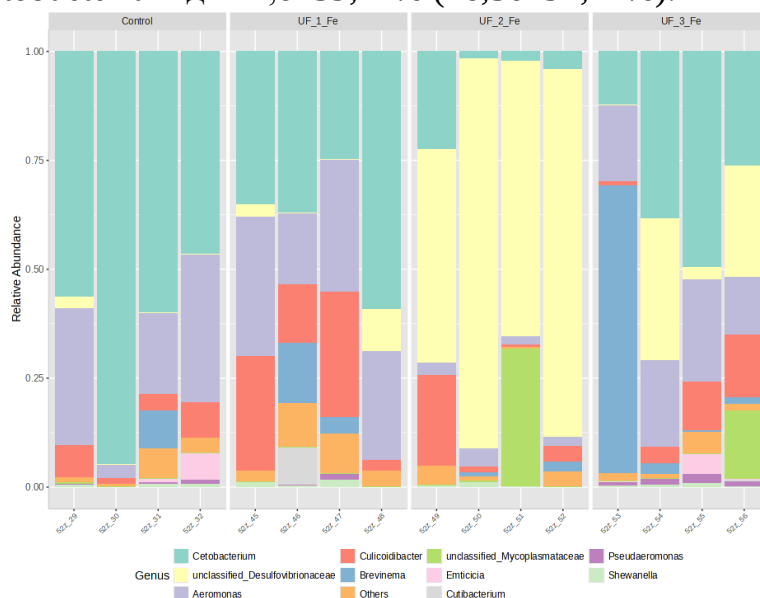


Рисунок 8 – Таксономический состав на уровне родов микробиоты рыб (**Control** – контрольная группа; опытные группы **UF_1_Fe**, **UF_2_Fe**, **UF_3_Fe** – добавка умбеллиферона в концентрациях 1, 2 и 3 мг/кг корма, соответственно, в сочетании с НЧ Fe 0,8 мг/кг).

Во II опытной группе значительно возросла доля неклассифицированных

представителей *Desulfovibrionaceae* до 48,82–89,27% (0–2,43% в контроле), появился род *Ancylobacter* в доле 0,04–0,35%. При этом снизилась доля *Cetobacterium* до 1,76–22,48% (46,5–94,74% в контроле), *Aeromonas* до 2,09–4,38% (3,19–34,99% в контроле), *Aurantimicrobium* до 0–0,6% (0,05–0,17% в контроле). Род *Emticicia* остался только в одном образце в доле 0,005% (0,16–6,3% в контроле в 3-х из 4-х образцов).

В III опытной группе существенно возросла доля *Pseud aeromonas* до 0,80–2,08% (0–0,85% в контроле). В 3-х из 4-х образцов появились новые доминанты: *Brevinema* в доле 66,25% в 1-м образце, неклассифицируемые роды семейства *Mycoplasmataceae* в доле 15,47% в 1-м образце и семейства *Desulfovibrionaceae* в долях 25,34 и 32,24% в 2-х образцах. Появился неклассифицируемый род порядка *Saccharimonadales* в доле 0,03–0,11%. Снизилась доля *Cetobacterium* до 12,23–49,61% (46,50–94,74%), *Citrobacter* до 0–0,02% (0,07–0,22% в контроле) и неклассифицируемого рода таксона MB19 до 0,09–0,32% (0,31–0,65% в контроле). Исчезли род *Neorickettsia* (0,01–0,20% в контроле в 3-х из 4-х образцов) и неклассифицируемый род семейства *Aeromonadaceae* (0,02–0,09% в контроле в 3-х из 4-х образцов).

Биосистема «микробиом кишечника-организм хозяина *Cyprinus carpio*»: зависимость элементного статуса рыбы от видового состава микробиом кишечника. Наиболее выраженные положительные корреляции отмечены для *Emticicia* с I ($r = 0,987$), Li ($r = 0,976$) и Cd ($r = 0,649$), а также для *Cetobacterium* с Cu ($r = 0,762$), Pb ($r = 0,622$) и Mg ($r = 0,605$). Существенные положительные связи выявлены также для *Aeromonas* с Pb ($r = 0,616$), Co ($r = 0,582$) и Se ($r = 0,556$), а для *Flavobacterium* - с Co ($r = 0,563$), Mn ($r = 0,536$) и Ca ($r = 0,498$). Одновременно ряд таксонов демонстрировал выраженные отрицательные корреляции с отдельными элементами. Наиболее сильные отрицательные связи зарегистрированы между *Citrobacter* и P ($r = -0,737$), *Aeromonas* и P ($r = -0,718$), *Cellvibrio* и P ($r = -0,656$), *Cetobacterium* и Ca ($r = -0,555$), а также *Culicoidibacter* и K ($r = -0,551$). Кроме того, отрицательные корреляции средней силы выявлены между *Shewanella* и K ($r = -0,472$), а также между *Flavobacterium* и K ($r = -0,518$) (рисунок 9).

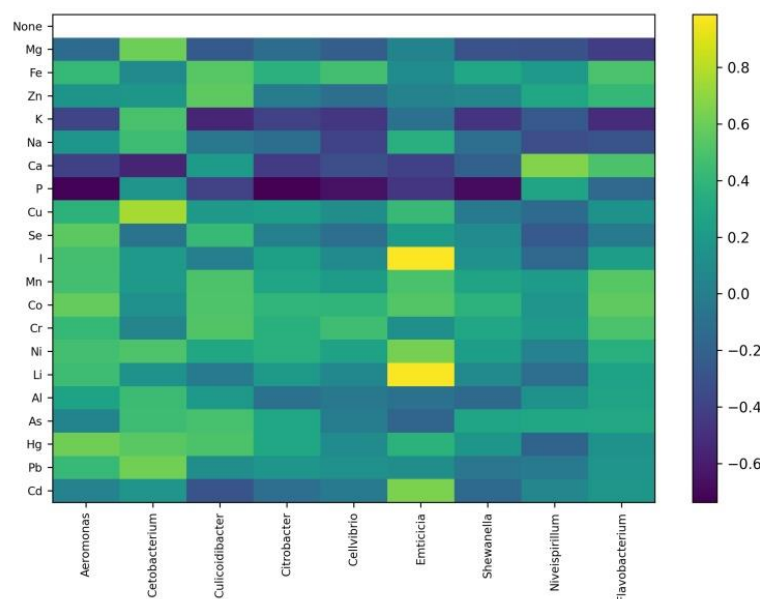


Рисунок 9 - Корреляции между родами микробиома и дополнительными элементами мышечной ткани

3.4 Результаты второго этапа исследований

Оценка среды обитания организмов аллохтонная экосистема в ходе исследований. Микрофлора водной среды оказалась в значительной зависимости от характера внешнего воздействия. В частности, на период окончания эксперимента ОМЧ в сравнении с третьей неделей показало увеличение численности бактериальных штаммов во всех группах: в контрольной – на 41,3% ($P \leq 0,05$), в I группе – 210,1% ($P \leq 0,001$), в II группе – на 219,9% ($P \leq 0,001$), в III группе – на 100,3% ($P \leq 0,01$). Анализ ОМЧ грамотрицательных микроорганизмов семейства *Enterobacteriaceae*, в том числе бактерий группы кишечной палочки показал снижение уровня биоты в контрольной группе на 97,2% ($P \leq 0,001$) в I опытной группе на 98,5% ($P \leq 0,001$), и повышение уровня во II группе в 30 раз ($P \leq 0,01$).

Общее микробное число лактобацилл в воде показало увеличение уровня микробиоты на протяжении эксперимента. На период восьмой недели эксперимента количество лактобактерий зафиксировали на следующем уровне: в воде аквариума I опытной группы произошло повышение на 154,2% ($P \leq 0,05$), в II группе – в 47 раз ($P \leq 0,001$), в III группе – пул микроорганизмов снизился в 4,4 раза ($P \leq 0,001$).

Адаптация *Lemna minor*. В контрольной группе на протяжении всего эксперимента отмечалось постепенное снижение содержания фотосинтетических пигментов. В I опытной группе внесение НЧ Fe частично предотвращало деградацию фотосинтетического аппарата. Во II группе при внесении ингибитора кворум-сенсинга содержание всех фотосинтезирующих пигментов превышало показатели контрольной группы. В III группе содержание фотосинтетических пигментов также сохранялось на сравнительно высоком уровне, чем в контрольной группе.

Таблица 1 - Содержание фотосинтезирующих пигментов *Lemna minor*

Начало эксперимента	Хл а		Хл б		Каротиноиды	
	х _{ср} , мг/кг	С _v , %	х _{ср} , мг/кг	С _v , %	х _{ср} , мг/кг	С _v , %
	0,35±0,04	11,5	0,22 ±0,04	8,1	0,20±0,02	10
Конец эксперимента	х _{ср}	С _v	х _{ср}	С _v	х _{ср}	С _v
	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
контроль	0,183±0,012	6,6	0,096±0,021	21,8	0,121±0,009	7,4
I	0,247±0,042	17	0,109±0,023	21,1	0,138±0,026	18,8
II	0,241±0,019	7,9	0,112±0,017	15,2	0,139±0,009	6,5
III	0,246±0,035	14,3	0,126±0,035	27,7	0,132±0,013	9,8

Адаптация *Cyprinus carpio*. Анализ морфологических параметров крови карпа в период окончания эксперимента показал достоверное повышение показателей. В частности, эритроцитов на 47,6% ($P \leq 0,05$) в I группе, на 109,5% ($P \leq 0,05$) в II группе и на 117,9% ($P \leq 0,05$) в III группе. Увеличение уровня лейкоцитов было зафиксировано только в II группе на 20,2% ($P \leq 0,05$) и в III группе на 22,8% ($P \leq 0,05$).

Динамика эссенциальных элементов в тканях карпа показала незначительные достоверные различия в группах. Исследуя достоверные изменения в концентрации химических элементов в опытных группах по отношению к контролю, мы сформировали элементный профиль (ЭП) этих групп:

$$\text{ЭП (I)} = \frac{\uparrow Mo}{\downarrow K}$$

$$\text{ЭП (II)} = \frac{\uparrow Li, Mo}{\downarrow Na, K}$$

$$\text{ЭП (III)} = \frac{\uparrow Mo}{\downarrow Na, Bi, As}$$

Выявлена аналогичная общая тенденция к снижению концентрации макроэлементов и токсичных элементов в опытных группах в сравнении с контролем. Одновременно, незначительно повышался уровень эссенциальных элементов.

Адаптация *Anodonta cygnea*. В исследованиях не выявлено заметной адаптации *Anodonta cygnea* к действию оцениваемых факторов. В контрольной группе изменение живой массы соответствовало нормальному росту двустворчатых моллюсков при отсутствии неблагоприятных условий среды. Стандартное отклонение на протяжении всего периода наблюдений изменялось незначительно (от 2,52 до 2,74).

$$\text{ЭП (I)} = \frac{\uparrow Li}{\downarrow Cu, Pb}$$

$$\text{ЭП (II)} = \frac{\uparrow Li, Mo}{\downarrow Cu, Cd}$$

$$\text{ЭП (III)} = \frac{\uparrow Na, Li, Sr}{\downarrow Mn, Pb}$$

Элементный статус мышечной ткани беззубки показал незначительные колебания макроэлементов. Выявлена тенденция к снижению эссенциальных и токсических элементов, с одновременным повышением некоторых микроэлементов.

Индикация процессов с использованием *Daphnia magna*. Исследование выживаемости *Daphnia magna* показало, что во всех группах жизнеспособность рачков сохранялась на протяжении эксперимента (таблица 2).

Таблица 2 – Выживаемость *Daphnia magna*, шт

Неделя	Группа			
	контрольная	I опытная	II опытная	III опытная
Начало эксперимента	10	10	10	10
1	10	10	10	10
2	14	14	14	10
3	15	13	15	15
4	10	14	14	11
5	12	15	11	16
6	10	15	14	28
7	11	14	16	11
8	33	27	16	12

Максимальная интенсивность воспроизводства отмечена в контрольной группе (33 особи). В I опытной группе этот показатель составил 27 особей, что также свидетельствует о высокой репродуктивной активности. Во II опытной группе прирост был менее выраженным - до 16 особей, однако увеличение численности происходило стабильно на протяжении всего эксперимента. В III опытной группе численность изменялась наиболее неравномерно: максимум был зарегистрирован на шестой неделе - 28 особей, после чего количество рачков снизилось до 12.

ВЫВОДЫ

1. Введение наночастиц железа и вещества-ингибитора кворум-сенсинг (умбеллиферона) в корм карпа не вызывает критических нарушений функционирования тест-организмов: адаптация беззубки обыкновенной (*Anodonta cygnea*), ряски малой (*Lemna minor*), дафнии большой (*Daphnia magna*) сопровождается адаптационными реакциями с сохранением высокой жизнеспособности, выражающийся в восстановлении роста и активности фотосинтетического аппарата.

2. Адаптация биосистемы «микробиом кишечника – организм хозяина *Cyprinus carpio*» на фоне поступления с кормом наночастиц железа сопровождается изменениями в составе кишечного микробиома с последующими изменениями элементного статуса карпа. В частности, увеличение содержания *Shewanella* сопровождалось повышением концентрации Mg ($r = 0,836$), Zn ($r = 0,702$), Na ($r = 0,651$ и Pb ($r = 0,679$), увеличение доли *Vibrio* ассоциировалось со снижением Fe ($r = -0,797$), Mg ($r = -0,812$), Na ($r = -0,753$), Zn ($r = -0,708$), I ($r = -0,749$), Co ($r = -0,682$), Cr ($r = -0,694$), Li ($r = -0,680$) и Al ($r = -0,699$). Род *Aeromonas* положительно коррелировал с Mg ($r = 0,612$), I ($r = 0,559$), Na ($r = 0,474$) и Fe ($r = 0,459$), *Niveispirillum* характеризовался отрицательными корреляциями с Mg ($r = -0,806$), Fe ($r = -0,668$), Zn ($r = -0,664$) и Na ($r = -0,644$).

3. Адаптация биосистемы «микробиом кишечника – организм хозяина *Cyprinus carpio*» на фоне поступления с кормом вещества-ингибитора кворум-сенсинга сопровождается изменениями состава кишечного микробиома с последующими взаимосвязанными изменениями элементного статуса карпа. В частности, род *Citrobacter* демонстрировал выраженные положительные корреляции с P ($r = 0,729$), K ($r = 0,723$), Se ($r = 0,723$) и Mg ($r = 0,632$), *Shewanella* — с Ni ($r = 0,628$), Co ($r = 0,587$), Mn ($r = 0,580$), Cu ($r = 0,568$), Cr ($r = 0,540$) и Fe ($r = 0,503$), а *Aeromonas* — с Ni ($r = 0,577$), Cr ($r = 0,551$), Fe ($r = 0,543$), Co ($r = 0,538$) и Cu ($r = 0,528$). Одновременно, *Cetobacterium* характеризовался отрицательными корреляциями с Fe ($r = -0,537$), Pb ($r = -0,525$), Cu ($r = -0,521$), Ni ($r = -0,520$), Co ($r = -0,517$) и Cr ($r = -0,514$), а наиболее выраженные отрицательные связи для *Emticicia* и *Niveispirillum* отмечены с Hg ($r = -0,992$ и $-0,890$, соответственно) и Mg ($r = -0,700$ и $-0,650$, соответственно).

4. Воздействие НЧ Fe и вещества-ингибитора QS на фотосинтезирующие процессы в экосистеме на модели ряски малой (*Lemna minor*), сопровождалось снижением интенсивности вегетативного размножения в начальный период эксперимента. По мере адаптации растений происходило восстановление физиологического состояния. Во всех опытных группах содержание фотосинтетических пигментов к завершению эксперимента оставалось выше, чем в контрольной группе. Выраженный адаптационный эффект наблюдался при использовании умбеллиферона как самостоятельно, так и в сочетании с НЧ Fe путем активации вегетативного размножения после периода адаптации.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Совместное применение наночастиц железа в дозировке 0,8 мг/кг и умбеллиферона в дозировке 1,0 мг/кг в кормлении рыб не наносит вреда пресноводной экосистеме водоема.

При этом, происходит снижение токсических веществ: ртути и алюминия, а также повышение пула макро- и микроэлементов: натрия, кальция, калия, фосфора, железа, хрома, марганца. Адаптация тест-объектов в период использования добавок характеризуется развитием адаптационных реакций, устойчивостью и повышением воспроизводительной функции.

Рекомендуется использовать комплекс тест-организмов, представляющих основные трофические уровни водных экосистем: макрофиты, зоопланктон, зообентос и рыб. Это обеспечивает экосистемный подход и повышает экологическую обоснованность нормативов.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Полученные результаты позволяют рассматривать систему «микробиом кишечника – организм хозяина» как перспективный объект экологического управления. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение функциональной активности кишечного микробиома с использованием метагеномных и метаболомных подходов, что позволит раскрыть механизмы регуляции элементного обмена, иммунного ответа и адаптации гидробионтов к воздействию экологических факторов.

Перспективным является исследование долговременного влияния наночастиц железа и ингибиторов Quorum sensing на микробиом и физиологическое состояние гидробионтов, включая оценку устойчивости выявленных изменений и экологической безопасности их применения. Используемые соединения представляют особый интерес благодаря своей биосовместимости: железо является естественным элементом биогеохимических циклов, а умбеллиферон относится к природным кумаринам, участвующим в регуляции взаимодействий микроорганизмов. При использовании физиологически обоснованных концентраций такие вещества обладают высоким потенциалом для создания экологически безопасных технологий.

Практическое значение дальнейших исследований связано с разработкой новых подходов к управлению микробными сообществами без применения антибиотиков. Ингибиторы Quorum sensing подавляют бактериальную коммуникацию и образование биопленок, не вызывая массовой гибели микроорганизмов, что снижает риск формирования антибиотикорезистентности и способствует сохранению экологического равновесия. В перспективе сочетание природных ингибиторов Quorum sensing и биосовместимых наночастиц может стать основой технологий, направленных на повышение устойчивости гидробионтов, сохранение биоразнообразия и поддержание стабильного функционирования пресноводных экосистем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ

1. Маленкина, К.А. Фитохимические вещества: свойства, экологическая безопасность и перспективы применения / К.А. Маленкина, А.Е. Аринжанов // Юг России: экология и развитие. – 2026. – Т.21. - №2. – С. 101-113. DOI: 10.18470/1992-1098-2026-2-9

2. Экологическая оценка действия наночастиц железа на углеродной матрице на физиологическое состояние и кишечный микробиом карпа / А.Е. Аринжанов, **К.А. Маленкина**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова // Экология урбанизированных территорий, 2026. - №2. – С. 96-103. DOI: 10.24412/1816-1863-2026-2-96-103

Патенты и базы данных

3. Патент № 2861430 С1 Российская Федерация, МПК А23К 20/00. Способ повышения эффективности выращивания карпа: заявл. 08.12.2025: опубл. 05.05.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621074 Российская Федерация. База данных гематологических показателей карпа на фоне действия умбеллиферона: заявл. 10.03.2026: опубл. 13.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621087 Российская Федерация. Влияние умбеллиферона на динамику живой массы карпа: заявл. 10.03.2026: опубл. 13.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

6. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621095 Российская Федерация. Морфо-физиологические показатели карпа при включении в рацион умбеллиферона: заявл. 10.03.2026: опубл. 13.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621117 Российская Федерация. Интенсивность роста карпа при включении в рацион умбеллиферона: заявл. 10.03.2026: опубл. 16.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621126 Российская Федерация. Влияние умбеллиферона на физиологическое состояние карпа: заявл. 10.03.2026: опубл. 16.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621130 Российская Федерация. Элементный состав мышечной ткани карпа под влиянием умбеллиферона: заявл. 10.03.2026: опубл. 16.03.2026 / А. Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет имени В.А.Бондаренко».

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621208 Российская Федерация. Динамика живой массы карпа на фоне действия умбеллиферона: заявл. 10.03.2026: опубл. 20.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621267 Российская Федерация. Влияние умбеллиферона на содержание макро- и микроэлементов в мышечной ткани карпа: заявл. 10.03.2026: опубл. 24.03.2026 / А.Е.

Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621357 Российская Федерация. Влияние ультрадисперсных частиц железа на углеродной матрице на динамику живой массы карпа: заявл. 10.03.2026: опубл. 27.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

13. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026621369 Российская Федерация. Концентрация химических элементов в мышечной ткани карпа при включении в рацион умбеллиферона: заявл. 10.03.2026: опубл. 27.03.2026 / А.Е. Аринжанов, Е. П. Мирошникова, Ю. В. Килякова, **К.А. Маленкина** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Прочие публикации

14. **Маленкина, К.А.** Биологически активные кормовые добавки в аквакультуре (обзор) / К.А. Маленкина, А.Е. Аринжанов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2024. - № 1 (105). - С. 291-297.

15. Влияние ультрадисперсных частиц железа на углеродной матрице на рост и развитие карпа / **К.А. Маленкина**, А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова // Ветеринария и кормление, 2024. - № 6. - С. 52-55.

16. Изучение нанокompозита Fe-C в кормлении рыб / **К.А. Маленкина**, А.Е. Аринжанов, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова // Микроэлементы в медицине, 2024. - Т. 25, № 2. - С. 57-59.

17. **Маленкина, К.А.** Результаты исследований и рекомендации по использованию добавок микроэлементов в кормлении рыб: органические соединения, хелаты, наночастицы и комплексные препараты (обзор) / **К.А. Маленкина**, А.Е. Аринжанов // Проблемы биологии продуктивных животных, 2024. - № 1. - С. 27-49.

18. **Маленкина, К.А.** Влияние нанокompозита Fe-C на продуктивность и гематологические показатели рыб // Актуальные вопросы и инновации в животноводстве: Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора С.Г. Леушина, 300-летию РАН и 90-летию создания Оренбургского научно-исследовательского института молочно-мясного скотоводства в системе Наркомата зерновых и животноводческих совхозов СССР. – Оренбург: ФГБНУ ФНИЦ БСТ РАН, 2024. – С. 130-133.

19. Влияние ультрадисперсных частиц железа на углеродной матрице на элементный состав мышечной ткани карпа / А.Е. Аринжанов, **К.А. Маленкина**, Е.П. Мирошникова, Ю.В. Килякова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование, 2025. - № 3(81). - С. 310-316.

20. **Маленкина, К.А.** Уникальность и применение фитохимических веществ // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 70-летию Оренбургского государственного университета, Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2025. – С. 3940-3944.

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