

На правах рукописи



**НОХРИН ДЕНИС ЮРЬЕВИЧ**

**ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНОГО  
СОСТОЯНИЯ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВОДОЁМОВ НА УРАЛЕ**

4.2.2. Санитария, гигиена, экология, ветеринарно-санитарная экспертиза  
и биобезопасность

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена в отделе экологии и незаразной патологии животных Уральского научно-исследовательского ветеринарного института – структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

Научный консультант: **Шкуратова Ирина Алексеевна**,  
доктор ветеринарных наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

Официальные  
оппоненты: **Литвиненко Александр Иванович**,  
доктор биологических наук, старший научный сотрудник,  
Институт биотехнологии и ветеринарной медицины –  
структурное подразделение ФГБОУ ВО «Государственный  
аграрный университет Северного Зауралья», кафедра  
водных биоресурсов и аквакультуры, профессор

**Романова Елена Михайловна**,  
доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Ульяновский государственный аграрный университет им.  
П.А. Столыпина», кафедра «Биология, экология,  
паразитология, водные биоресурсы и аквакультура»,  
заведующий

**Пронина Галина Иозепоовна**,  
доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Российский государственный аграрный университет –  
МСХА им. К.А. Тимирязева», кафедра зоологии,  
профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Донской государственный технический университет**»

Защита диссертации состоится «16» октября 2025 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета 35.2.038.01 на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет» по адресу: 620000, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42, ауд. 1203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет» и на сайте: [https://urgau.ru/images/NAUKA/Zashita\\_dissert/Nohrin/diss\\_Nohrin.pdf](https://urgau.ru/images/NAUKA/Zashita_dissert/Nohrin/diss_Nohrin.pdf).

Автореферат размещен на официальных сайтах ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/> и ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет»: <https://urgau.ru/naukaa/zashchity-dissertatsij>.

Автореферат разослан «    »                      2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Неверова Ольга Петровна

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Природные особенности Урала обусловили высокий уровень промышленного освоения его территории с созданием предприятий горнодобывающей, металлургической, химической промышленности, а также объектов энергетики и транспортной инфраструктуры. Это привело к образованию природно-техногенных биогеохимических провинций с высоким содержанием тяжёлых металлов и других токсикантов в окружающей среде (Грибовский Г. П., 2003; Ермаков В. В., 2003). Сложившаяся сложная экологическая ситуация требует оценки в изменяющихся технологических, экономических и климатических условиях, а также нуждается в коррекции – для осуществления эффективного развития аграрного сектора и получения качественной продукции (Грибовский Г. П., 1996; Донник И. М., 2010, Шкуратова И. А., 2015). Эти задачи актуальны не только для растениеводства и животноводства, но и для осуществления рыбохозяйственной деятельности на многочисленных и разнообразных водоёмах Урала. Здесь насчитывается более 6 тыс. озёр, а сток рек, принадлежащих бассейнам Печоры, Волги, Урала и Оби, зарегулирован несколькими тысячами прудов и водохранилищ. Многие из них имеют рыбохозяйственное значение и нуждаются в пристальном экологическом и ветеринарно-санитарном контроле, поскольку естественные и техногенные токсиканты, накапливаясь в цепях питания гидробионтов, а далее – в органах и тканях промысловых видов рыб, оказывают негативное воздействие на их популяции и ухудшают качество рыбопродукции (Моисеенко Т. И., 2006, 2019; Jezierska В., 2006; Wood С. М., 2012 и др.).

Согласно Стратегии научно-технологического развития РФ (указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145) возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду и вопросы продовольственной безопасности относятся к большим вызовам современности (п. 15 г, д) и определяют приоритетность таких направлений развития, как переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству и создание безопасных качественных продуктов питания (п. 21 г).

**Степень научной разработанности проблемы.** История изучения водных объектов Урала насчитывает более 100 лет: она берёт начало от химических анализов соляных и лечебных озёр и трудов натуралиста Л. П. Сабанеева (1875). На протяжении XX века шли активные исследования по всему спектру рассматриваемых в настоящей работе вопросов, и к 1980-90-м гг. была хорошо изучена геология Урала, включая коры выветривания и определяемый ими высокий микроэлементный фон. Были исследованы процессы формирования гидросферы Урала, химического состава уральских рек и озёр, включая рассеянные элементы (Андреева М.А., 1973; Черняев А.М. 1975; Черняева Л.Е. с соавт., 1977; Андреева М.А., Калишев В.Б., 1991). Вопросы болезней рыб в уральских водоёмах изучали Кашковский В.В. (1974) и Сединкин А.Н. (1987).

В настоящее время исследования по лимнологии, гидрологии, гидрохимии, экологии и палеоэкологии водоёмов Урала продолжают коллективы из Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН

(Масленникова А. В., Удачин В. Н., 2014; Гаврилкина С. В., 2018), Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета (Захаров С. Г., 2020), Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Мирошниченко С. А., 2021; Лепихин А. П., 2021), Пермского государственного национального исследовательского университета (Китаев А. Б., 2021), Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов (Хафизов А. Р. с соавт., 2021; 2022), Челябинского государственного университета (Корляков К. А., Ходоровская Н. И. с соавт., 2014; 2021). Вопросы гидрохимии и рыбоводства исследуют сотрудники Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (Силивров С. П., Еремкина Т. В., 2019), радиобиологии и радиоэкологии водоёмов – сотрудники Института экологии растений и животных УрО РАН (Трапезников А. В., 2006) и Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА (Тряпицына Г. А., Пряхин Е. А., 2019), Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета (Левина С. Г., Дерягин В. В., 2014, 2021). Ветеринарно-санитарное и экологическое состояние уральских рек и водохранилищ изучают в Южно-Уральском государственном аграрном университете (Дерхо М. А., 2021; Красноперова Е. А., 2014). В Институте экологии растений и животных УрО РАН накоплены и обобщены обширные данные об ихтиофауне и гидробиологии водоёмов Урала (Богданов В. Д., 2007).

Помимо этих исследований к настоящему времени в научной литературе широко представлены исследования по влиянию техносферы на водный мир и ихтиофауну, изучены процессы транспорта поллютантов в системе «вода – донные отложения – рыба», особенности накопления токсикантов в рыбе и вызываемые ими нарушения, разработаны ПДК и периодически дополняются списки наиболее опасных для рыбохозяйственных водоёмов веществ. Вместе с тем существует ряд направлений исследований и вопросов, ответы на которые невозможно дать на основе прошлого опыта и вскрытых общих закономерностей. К ним относятся вопросы комплексной оценки биокондиции водной среды в условиях сложного взаимодействия поллютантов между собой и с естественными факторами среды, вопросы химического загрязнения водоёмов конкретными промышленными предприятиями, вопросы управления качеством воды в крупных водных системах, проблемы использования тёплых вод промпредприятий и ГРЭС в аквакультуре, а также совершенствование нормативно-правовой базы экологического и ветеринарно-санитарного контроля рыбохозяйственных водоёмов и качества рыбной продукции. Все они требуют продолжения исследований на современном научном уровне, в меняющихся условиях и с учётом особенностей природно-техногенного комплекса акваторий и прилегающих территорий. Данная ситуация и определила цель и задачи настоящего исследования.

**Цель и задачи.** Цель исследования – оценить экологическое и ветеринарно-санитарное состояние рыбохозяйственных водоёмов Урала.

Для её достижения были поставлены следующие задачи:

1. Изучить особенности химического состава воды рек, озёр и водохранилищ Урала и дать сравнительную оценку её качества.

2. Изучить содержание и распределение тяжёлых металлов по акватории водоёмов в составе воды и донных отложений, идентифицировать парагенетические ассоциации элементов и предложить подходы к использованию этой информации в экологическом мониторинге техногенно нагруженных водных систем.

3. Изучить содержание тяжёлых металлов в тканях, оценить токсические и генотоксические эффекты в эритроцитах периферической крови промысловых рыб из водоёмов Челябинской области и предложить подходы к комплексной оценке экологического состояния водоёмов.

4. Разработать способы снижения содержания тяжёлых металлов в рыбе.

**Научная новизна.** Впервые проведён анализ содержания тяжёлых металлов в донных отложениях озёр Маян и Куракли-Маян, Сугояк и Чебакуль, Верхнеуральского, Магнитогорского и Южноуральского водохранилищ; проведена оценка качества воды водохранилищ Челябинской области методом приборного биотестирования на простейших. Впервые установлены уровни накопления токсичных элементов в рыбе из озёр Маян и Куракли-Маян, Сугояк, Чебаркуль, Чебакуль, из реки Миасс, из Аргазинского, Верхнеуральского, Магнитогорского, Шершнёвского и Южноуральского водохранилищ, а также из Пруда на Безымянной балке. Определены уровни цитогенетических и цитологических нарушений в эритроцитах периферической крови рыб из озёр и крупных водохранилищ Челябинской области. Впервые проведён многомерный статистический анализ содержания и распределения тяжёлых металлов в донных отложениях уральских водоёмов, выявлены и интерпретированы устойчивые ассоциации элементов. Впервые разработано статистическое сопровождение методологии корреляционной адаптометрии и проведена оценка уровня адаптационных трат на поддержание микроэлементного гомеостаза в популяциях рыб из водоёмов с разной степенью антропогенной нагрузки. Впервые разработана методология использования необъяснённой дисперсии содержания металлов в рыбе для выявления элементов-ксенобиотиков.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в углублении понимания влияния природных и техногенных факторов на состояние популяций промысловых видов рыб. Предложены подходы к выявлению паттернов загрязнения в водоёмах Урала. Определена частота цитогенетических и цитотоксических нарушений в клетках крови рыб. Установлены уровни содержания тяжёлых металлов в мышечной и костной тканях рыб из уральских водоёмов. Внесён вклад в разработку методологии корреляционной адаптометрии для интегральной количественной оценки влияния средовых факторов на популяции организмов, в том числе – популяции рыбы.

Научно-практическая значимость работы определяется тем, что в условиях отсутствия нормативов содержания тяжёлых металлов в донных отложениях предложены граничные значения для оценки степени загрязнения водных объектов Урала. Выделение и идентификация паттернов загрязнения в водоёмах позволяет установить источники загрязнения на ранних этапах. Предложено использовать методологию корреляционной адаптометрии по комплексу биологических признаков рыб для комплексной оценки биокондиции рыбопромысловых водоёмов.

**Методология и методы исследований.** Для достижения цели и решения поставленных задач были использованы следующие группы методов: 1) химико-аналитические (титриметрический, гравиметрический, потенциометрический, спектрофотометрический, атомно-абсорбционный спектрофотометрический, рентгенофлюоресцентный анализ на пучках синхротронного излучения, капиллярный электрофорез), 2) морфометрические, 3) паразитологические, 4) цитологические и цитогенетические (нарушения ядра и цитоплазмы в эритроцитах крови рыб), 5) биотестирования, 6) статистические (планирование эксперимента, описательная статистика, выборочные сравнения, поиск связей и зависимостей, многомерные методы, пространственная интерполяция).

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты оценки химического состава и качества воды уральских водоёмов и водотоков (озёр, рек, водохранилищ) по показателям содержания веществ, превышающих ПДК<sub>ВР</sub>, и по результатам биотестирования.

2. Химический состав воды водоёмов определяется преимущественно природными факторами, тогда как химический состав донных отложений более зависит от степени техногенных воздействий.

3. Комплекс химико-токсикологических и статистических методов как основа для объективной оценки и нормирования состава природных и техногенных ассоциаций элементов в донных отложениях.

4. Многомерный статистический анализ данных по содержанию тяжёлых металлов в костной и мышечной ткани рыб позволяет выявлять элементы-ксенобиотики в водоёмах по необъяснённой дисперсии химического состава тканей и проводить интегральную оценку состояния популяций рыб по результатам корреляционной адаптометрии.

5. Уровень цитогенетических нарушений в эритроцитах рыбы и степень ее инвазированности как критерий оценки экологического и ветеринарного состояния популяций промысловых рыб.

6. Способы снижения концентрации тяжёлых металлов в рыбе.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов работы, обоснованность основных положений и выводов подтверждается использованием достаточных по объёмам выборок объектов исследования (рыбохозяйственные водоёмы) и предметов исследования внутри объекта (пробы воды, донных отложений и рыбы), использованием современных аналитических методов (атомно-абсорбционный анализ, капиллярный электрофорез) и современных методов статистической обработки данных (ординационные техники, ресэмплинг-техники бутстрэпа и складного ножа), применением специальных пакетов анализа данных и визуализации результатов (программно-статистическая среда R с библиотеками boot, car, vegan и др., KyPlot, PAST, SPSS, GW\_Chart, UnCensor, Variowin, 3DField).

Результаты исследований вошли в отчеты о научно-исследовательской работе отдела экологии и незаразной патологии животных Уральского научно-исследовательского ветеринарного института – структурного подразделения ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр

Уральского отделения Российской академии наук в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по темам «Разработать методы и средства снижения негативного воздействия экотоксикантов на организм сельскохозяйственных животных на территориях экологического загрязнения зоны Южного Урала» (№ 0773-2018-0006), «Разработать систему эколого-биологической безопасности производства продукции животноводства», (№ 0773-2019-0003), представленных и одобренных на заседаниях Ученого совета ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН (2018-2020 гг.).

Результаты были представлены на Всероссийских и областных научных, научно-практических и научно-методических конференциях: «Актуальные проблемы ветеринарной медицины» (Троицк, 2001), «Новые энтеросорбенты и фармакологически активные вещества и их применение в ветеринарии и животноводстве» (Троицк, 2002), «Водные ресурсы Южного Урала – 2004. Проблемы водохозяйственного комплекса» (Челябинск, 2004), «Экологические проблемы промышленных регионов» (Екатеринбург, 2004), «Экологическая политика в обеспечении устойчивого развития Челябинской области» (Челябинск, 2004), «Охрана водных объектов Челябинской области. Проблемы и пути их решения в условиях современного законодательства» (Челябинск, 2007), «Фармакологические и экотоксикологические аспекты ветеринарной медицины» (Троицк, 2007), «Охрана водных объектов Челябинской области. Современные технологии водопользования» (Челябинск, 2008, 2010), «Экология в высшей школе: синтез науки и образования» (Челябинск, 2009), «Актуальные вопросы современного естествознания Южного Урала» (Челябинск, 2016, 2018), а также на Российской биогеохимической школе «Геохимическая экология и биогеохимическое изучение таксонов биосферы» (Москва, 2003), на Международных научных конференциях «Экология, охрана водных ресурсов и водоочистка» (Челябинск, 2011), «Современные направления инновационного развития ветеринарной медицины, зоотехнии и биологии» (Уфа, 2015), «Международная научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РСФСР, доктора ветеринарных наук, профессора Кабыша Андрея Александровича» (Троицк, 2017), Международном симпозиуме «Экология и эволюция: новые горизонты», посвящённому 100-летию академика С.С. Шварца (Екатеринбург, 2019), конференциях «Образование магистров: проблемы и перспективы развития (Челябинск, 2021) и «International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology» (BIO Web of Conferences, 2024).

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на биологическом факультете ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» (Акт внедрения от 12.09.2023, Приложение Е).

Работа соответствует паспорту специальности 4.2.2. Санитария, гигиена, экология, ветеринарно-санитарная экспертиза и биобезопасность по п.п. 2, 8, 10, 12, 20.

**Личный вклад автора.** Планирование научных исследований, экспедиционные работы и анализ проб на содержание тяжёлых металлов проводились совместно с доктором вет. наук Ю. Г. Грибовским (Уральский филиал ФГБНУ «ВНИИВСГЭ», ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН). Анализ донных отложений и зольного материала рыбы методом РФА-СИ проведены доктором геолого-минер. наук Э. В. Сокол и кандидатом геолого-минер. наук Е. Н. Нигматулиной (ФГБУН ИГМ СО РАН). Эксперимент по внесению добавок в корм рыбам садкового хозяйства проведён совместно с кандидатом вет. наук М. Г. Жуковой (УГАВМ). Лично автором выполнены: экспедиционные работы на водоёмах с отбором проб, анализ химического состава воды, цитогенетические исследования и статистический анализ всех данных с интерпретацией результатов. Также проведены поиск и обобщение сведений из литературных источников, формулирование выводов и практических предложений, подготовка основных публикаций, написание и оформление рукописи.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 59 печатных работ, из них: 13 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (Вода: химия и экология – 4, Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии» – 4, Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии – 4, Аграрный вестник Урала – 1), 6 – в изданиях, входящих в международные цитатно-аналитические базы данных Scopus и Web of Science («Water Resources» – 2, «Russian Journal of Ecology» – 1, «Contemporary Problems of Ecology» – 1, «E3S Web of Conferences» – 1, «Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries» – 1), 12 – в других научных журналах и изданиях, 10 – в материалах международных и всероссийских научных конференций, 17 – в материалах региональных научных конференций, а также 1 – коллективная монография под редакцией соискателя.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация изложена на 362 страницах компьютерного текста и включает: введение, обзор литературы, методологию и методы исследования, результаты и анализ результатов собственных исследований, выводы, практические предложения, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 731 источника (399 отечественных и 332 зарубежных), 6 приложений. Работа иллюстрирована 46 таблицами и 50 рисунками.

**Благодарности.** Автор глубоко признателен за участие в исследованиях Ю. Г. Грибовскому, Э. В. Сокол, Е. Н. Нигматулиной, а также Г. И. Хасановой, А. Н. Торчицкому, П. В. Дергалёву, А. А. Тлеугабилову, доктору биол. наук Е. А. Колеснику (Уральский филиал ФГБНУ «ВНИИВСГЭ») и Н. А. Давыдовой (ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН). Ценные советы по работе дали: доктор ветеринарных наук О. В. Соколова, доктор ветеринарных наук Е. В. Печура (ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН) и кандидат биологических наук К.А. Корляков (ФГБОУ ВО ЧелГУ). Автор благодарит всех принимавших участие в исследованиях лиц и соавторов и выражает глубокую признательность научному консультанту – члену-корреспонденту РАН, доктору ветеринарных наук, профессору И.А. Шкуратовой за помощь в работе, ценные советы и замечания.

## СОБСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Методология и методы исследований

Исследования выполнены в период с 2001 по 2023 гг. в Уральском филиале ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии» (Уральский филиал ФГБНУ «ВНИИВСГЭ») по государственной отраслевой научно-технической программе ОНТП 05.03.28, темам: «Провести комплексную ветеринарно-санитарную и экологическую оценку водохранилищ тепловых электростанций и дать научное обоснование мероприятиям по их рыбохозяйственному использованию» (2001-2005 гг.), «Провести комплексную ветеринарно-санитарную и экологическую оценку водоёмов, находящихся в зоне выбросов крупных промышленных предприятий Урала, и дать научное обоснование мероприятиям по их рыбохозяйственному использованию» (2006-2010 гг.), «Провести мониторинг почв, водоисточников и растений на содержание экотоксикантов в природных биогеохимических провинциях Южного Урала» (2011-2015 гг.), а также ОНТП 0579-2015-0011 «Комплексная ветеринарно-санитарная и экологическая оценка озёрных рыбоводных хозяйств Южного Урала» (2016-2017 гг.). После присоединения Уральского филиала ФГБНУ «ВНИИВСГЭ» к федеральному государственному бюджетному научному учреждению «Уральский научно-исследовательский ветеринарный институт» и последующей его реорганизации с 2018 по 2023 гг. исследования были продолжены в отделе экологии и незаразной патологии животных Уральского научно-исследовательского ветеринарного института – структурного подразделения ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по темам: «Разработать методы и средства снижения негативного воздействия экотоксикантов на организм сельскохозяйственных животных на территориях экологического загрязнения зоны Южного Урала» (№ 0773-2018-0006), «Разработать систему эколого-биологической безопасности производства продукции животноводства», (№ 0773-2019-0003).

Объектами исследования выступил ряд уральских водоёмов (озёра, реки, водохранилища), а предметами – вода, донные отложения и рыба (таблица 1). В воде изучались 22-37 показателей химического состава и качества (общие показатели, главные ионы, биогенное и органическое вещество, растворённые газы, микроэлементы и ТМ), а также проводилась экспресс-оценка токсичности; в донных отложениях – концентрация 8-10 ТМ (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb + Cr, Sr), в рыбе – концентрация 8 ТМ (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb), наличие паразитов, уровень цитогенетических и цитотоксических нарушений в эритроцитах крови. Системные исследования выполнены на озёрах Маян, Куракли-Маян, Сугояк, Чебакуль и Чебаркуль, на реке Миасс, а также на водохранилищах: водоёмах-охладителях ГРЭС (Троицкое, Южноуральское), водоёмах в зоне влияния крупных металлургических предприятий (Аргазинское, Магнитогорское), питьевом водоёме г. Челябинска (Шершнёвское) и удалённом от крупных городов и предприятий Верхнеуральском водохранилище. Кроме натуральных исследований проведены два экспериментальных: 1) в научно-производственном опыте на карпах тепловодного садкового хозяйства

Южуральского водохранилища изучено влияние кормовых микродобавок (сера, полисорб и белая глина) на ростовые процессы и содержание ТМ в тканях; 2) на мелочи (плотва, окунь) из этого же водоёма оценено влияние кулинарных обработок рыбы (соление, варка) на содержание в ней ТМ.

Таблица 1 – Общий объём исследований воды, донных отложений и рыбы

Предметы и объекты исследования	Количество			
	водоёмов	проб, экземпляров	показателей	анализов, клеток
Химические показатели (гидрохимия и тяжёлые металлы)				
Вода				
Озёра	54	85	22-36	> 1870
Реки	29	61	22-37	> 1342
Водоохранилища и пруды	13	154	22-37	> 3388
Всего	96	300	22-37	> 6600
Донные отложения				
Озёра	9	33	8-10	283
Реки	14	23	8-10	206
Водоохранилища и пруды	10	107	8-10 (до 33)	1075
Всего	33	163	8-10	1564
Рыба				
Озёра	5	61 (5 видов)	8	488
Реки	3	36 (5 видов)	8	288
Водоохранилища и пруды	8	189 (12 видов)	8	1512
Всего	16	286	8	2288
Биотестирование воды				
Водоохранилища	5	62	1	62
Паразитарные болезни рыб				
Озёра	2	50 (2 вида)	–	> 50
Водоохранилища	6	356 (2 вида)	–	> 356
Цитогенетические и цитотоксические нарушения в эритроцитах рыбы				
Озёра	3	44 (2 вида)	8	78,7 тыс.
Водоохранилища	4	76 (2 вида)	8	159,5 тыс.

Пробы воды отбирались на запланированных станциях с помощью батометра при контроле положения GPS-навигатором преимущественно со среднего горизонта после предварительной батиметрии (трос с грузом или эхолот Matrix 37 (Humminbird<sup>®</sup>, USA), на малых озёрах – с поверхностного горизонта. Анализ содержания в воде главных ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ), соединений азота и фосфора ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), а также ионов  $\text{F}^-$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  и  $\text{Ba}^{2+}$  проведён методом капиллярного электрофореза на системе «Капель 103-Р» (Группа компаний «Люмэкс»<sup>®</sup>, Россия) по методикам М 01-31-99, ГОСТ 31869-2012, ПНД Ф 14.1:2.4.157-99 (2013) с использованием пакета «Мультихром для Windows» (версия 1.5, ЗАО «Амперсенд»). Определение концентрации микроэлементов и ТМ проводилось на атомно-абсорбционных спектрометрах (ААС): пламенном «ААС-1» («Carl Zeiss Jena», Германия) и электротермических «Квант-Z ЭТА» (НПФ «Кортэк», Россия) и «МГА-915М» (Группа компаний «Люмэкс»<sup>®</sup>, Россия) по методикам ГОСТ Р 51309-99, ПНД Ф 14.1:2.253-09 с использованием программ

Quant Zeeman for Windows (v. 1.1., Cortek Ltd.) и МГА-915 (версия 1.0.68.23). Прочие показатели определяли по соответствующим нормативным документам. Оценка токсичности воды методом биотестирования проведена на импульсном фотометре «Биотестер-2» (ЦНТТМ «Квант», Санкт-Петербург, Россия) с использованием в качестве тест-объекта культуры инфузории *Paramecium caudatum*.

Донные отложения (ДО) отбирались в тех же точках, что и вода с помощью бентосного дночерпателя (5-10 см слой осадков). Пробоподготовка для ААС-определения подвижных (кислоторастворимых) форм 10 ТМ (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Pb) велась методом мокрой минерализации согласно Методическим указаниям (1993). Определение ТМ в растворах 1н HNO<sub>3</sub> проведено на пламенном ААС «AAS-1» (большинство элементов) или на электротермических «Квант-Z ЭТА», «МГА-915М» (Cr, Cd, Pb и другие элементы в случае низких концентраций). Валовое определение ТМ проведено согласно РД 52.18.685–2006 и ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002 (2011). Часть проб ДО и зольного материала ГРЭС была проанализирована на валовое содержание 33 элементов методом рентгенофлуоресцентного анализа на пучках синхротронного излучения (РФА-СИ) в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Рыбу на анализ брали из уловов. Ихтиопатологические исследования проведены стандартными методами (МУ 13-4-2/1751). Кровь на анализ цитогенетических (микроядра) и цитотоксических эффектов отбирали из хвостовой вены, мазки сушили на воздухе, фиксировали в смеси Никифорова и окрашивали азур-эозином по Романовскому. Анализ препаратов проводили на бинокулярном микроскопе SK-14 («PZO Warszawa», Польша) при увеличении 12×100 в количестве 500–2000 Кл. / экз. Помимо микроядер учитывали следующие нарушения и маркёры токсикозов: амитоз, дефекты ядра (инвагинация, пикноз, смещение, ядерные отростки) и нарушения размеров и формы (анизоцитоз, пойкилоцитоз). После пробоподготовки сухой минерализацией по МУ для пищевых продуктов в костной и мышечной тканях рыб проводилось определение 8 ТМ аналогично ДО.

Научно-производственный опыт по введению микродобавок в корм карпов проведён в тепловодном садковом хозяйстве «Аква-1», расположенном в сбросном канале Южноуральской ГРЭС. Объект исследования – 205 двухгодовалых карпов *Cyprinus carpio carpio* (L., 1758). До опыта рыбу измеряли (длина и высота тела) и взвешивали, а у 5 экз. было определено содержание ТМ в мышечной и костной тканях. Из оставшихся 200 были сформированы 4 группы по 50 шт., получавшие в течение 30 сут: стандартный комбикорм, микродобавку серы кормовой (из расчета 0,03 г/кг живой массы), полисорба ВП (0,1 г/кг) или белой глины (0,03 г/кг). Через 30 сут всех рыб повторно измеряли, а 5 экз. из каждой группы анализировали на содержание ТМ. Также в тканях 5 экз. было проведено определение белка, жира, золы и влажности по ГОСТ 7636–85.

Эксперимент по кулинарной обработке рыбы с целью снижения содержания в ней ТМ проведён на окуне *Perca fluviatilis* (L., 1758) и плотве *Rutilus rutilus* (L., 1758) из Южноуральского водохранилища. Рыба была рассортирована на 5 сходных по массе и промысловой длине групп, по 5 шт. Одна группа свежей рыбы выступала контролем, 2 группы цельной рыбы солили в 30%-ном растворе поваренной соли в течение 2 и 14 сут, 2 группы варили в 1 литре водопроводной воды в течение 15 мин

без добавления соли и с добавлением 10 г NaCl. В конце эксперимента в мышечной и костной тканях проводилось определение 8 ТМ как обычно (см. выше).

Статистический анализ данных включал методы описательной статистики, преобразования данных, анализа и разделения смеси распределений, выборочных сравнений, поиска связей, а также пространственные интерполяции и многомерные эксплораторные техники. Для количественных показателей рассчитывали средние значения с 95%-ными доверительными интервалами (95% ДИ), вычисленными техникой непараметрического бутстрэпа (метод процентилей,  $n=99999$ ), реже – медиану с квартилями. Для качественных показателей вычисляли абсолютные (в шт.) и относительные (в %) частоты, которые снабжали 95%-ным байесовским априорным интервалом Джеффриса. В ряде случаев применяли нормализующее преобразование Бокса – Кокса. Разделение смеси распределений проводили по *EM*-алгоритму. Расчёты выполнены в пакетах PAST (v. 2.17c–4.06) и EpiTools. В зависимости от задачи и числа групп сравнение выборок проводили с использованием: критериев Манна – Уитни и Краскела – Уоллиса, апостериорных сравнений по Данну или Стилу, двухфакторного дисперсионного анализа (в том числе рандомизационного) и критерия Фридмана. Сравнения выборок по качественным признакам проводили с помощью критерия хи-квадрат Пирсона, а для слабонасыщенных таблиц сопряжённости – рандомизационной процедурой Монте-Карло. Для установления связей и оценки согласия между двумя признаками применяли корреляцию Спирмена, а между несколькими – конкордацию Кендалла. Расчёты выполнены в пакетах PAST и KyPlot (v.2.0.beta15 – 6.0.1). Интерполяцию пространственных переменных и построение карт-схем проводили в пакете 3DField (v. 2.9.8.0) методом минимальной кривизны или геостатистическим методом ординарного кригинга, параметры для которого (эффект самородка, дальность и порог) рассчитывали в ходе анализа вариограмм в пакете Variowin (v. 2.21).

В работе широко использовались многомерные методы анализа данных. Для поиска групп согласованно изменяющихся показателей и объектов со сходными их значениями применяли иерархический кластерный анализ методом Уорда с использованием корреляции Спирмена для показателей и рангов для объектов. Полученные дендрограммы совмещали в кластерной тепловой карте с использованием пакета rheatmap программно-статистической среды R. Для редукции данных с обобщением применяли ординационные многомерные техники: неограниченные – линейный (PCA) и нелинейный (CATPCA) анализ главных компонент, факторный анализ, а также ограниченные – анализ избыточности RDA и PLS-регрессию. PCA проводили классическим способом, а также с использованием вращения «варимакс», факторный анализ – методом главных факторов с итерациями по общностям с вращением «варимакс». Расчёты и построение ординационных диаграмм проводили в пакетах PAST и KyPlot, а CATPCA – в SPSS (v. 15.0). RDA и PLS-регрессию проводили в пакетах Canoco (v. 4.51) и vegan (v. 2.5-7) для среды R. Для выделения особенностей содержания металлов в группах рыбы производственного опыта применяли линейный дискриминантный анализ с переходом к каноническим осям. Во всех случаях статистически значимыми признавали эффекты при  $p \leq 0,05$ , незначимыми – при  $p > 0,10$ , в промежуточных случаях обсуждали тенденции к проявлению эффектов.

## 2.2. Результаты собственных исследований

### 2.2.1 Особенности химического состава и качества воды уральских водных объектов

Проведён статистический анализ данных по химическому составу воды в водоёмах и водотоках трёх типов (озёра, реки, водохранилища и пруды). С использованием гидрохимических диаграмм Пайпера (рисунок 1) дана характеристика воды водоёмов по отечественной классификации О. А. Алёкина (1943) и западной У. Бэка (1961).

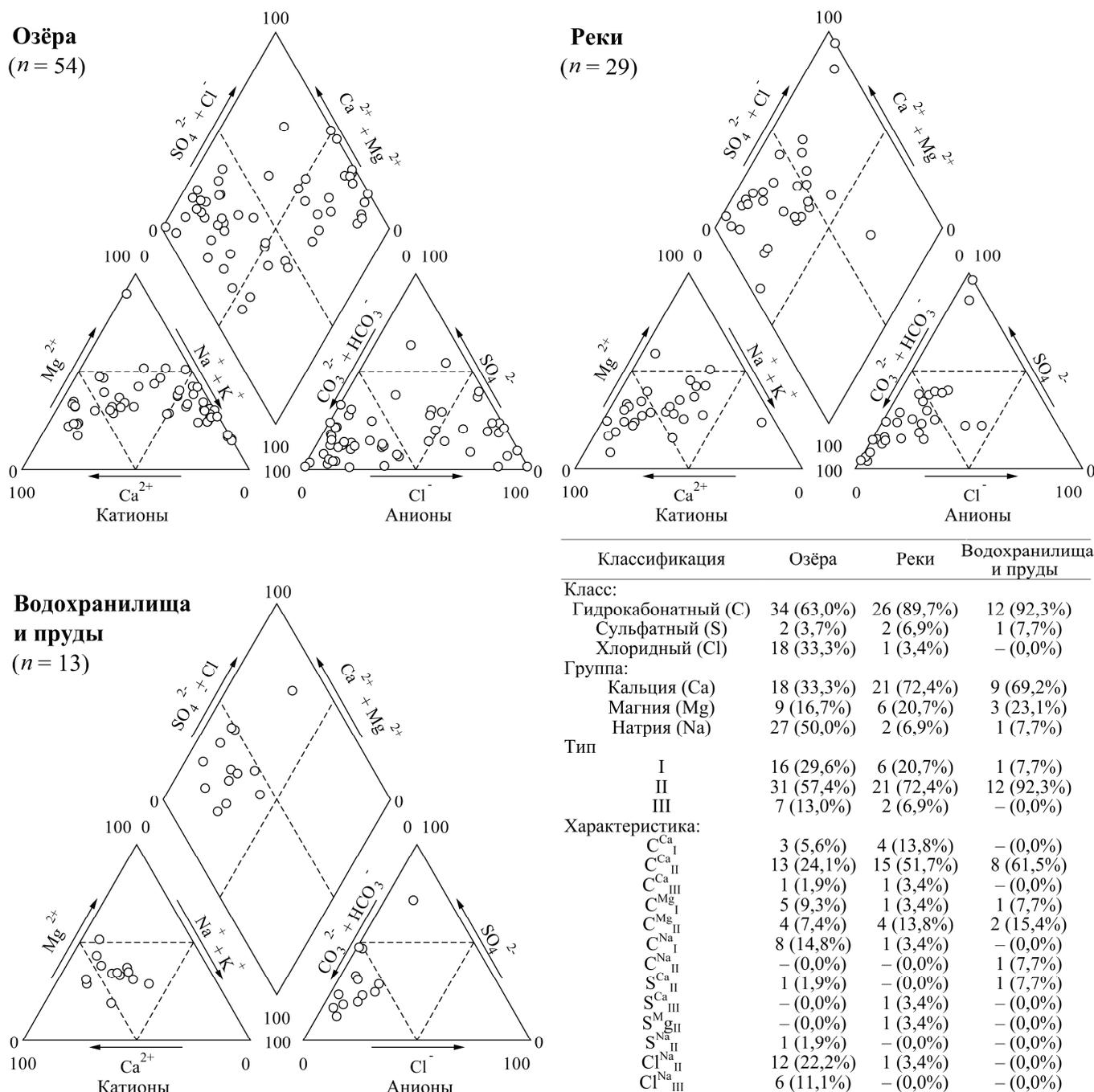


Рисунок 1 – Соотношение главных ионов на диаграммах Пайпера и классификация воды изученных водоёмов по О. А. Алёкину (1943)

Видимые на диаграммах тренды изменения химического состава указывают на следующие ведущие гидрогеохимические процессы формирования состава вод: для рек – растворение кальцита, для водохранилищ – реакции растворения и ионного обмена альбита и доломита. Для обобщения данных по гидрохимии водоёмов построена кластерная тепловая карта, позволившая выделить 2 кластера для показателей (природный тип воды и биогенное, органическое вещество) и 2 кластера для водоёмов (с высокой минерализацией воды и все остальные), но оказавшаяся малоинформативной с точки зрения выявления эффектов техногенного загрязнения и рыбохозяйственного использования. Поэтому для каждого типа водоёмов были рассчитаны частоты (в %) превышения ПДК<sub>ВР</sub> по всем изученным нормируемым показателям и построена вторая тепловая карта (рисунок 2).

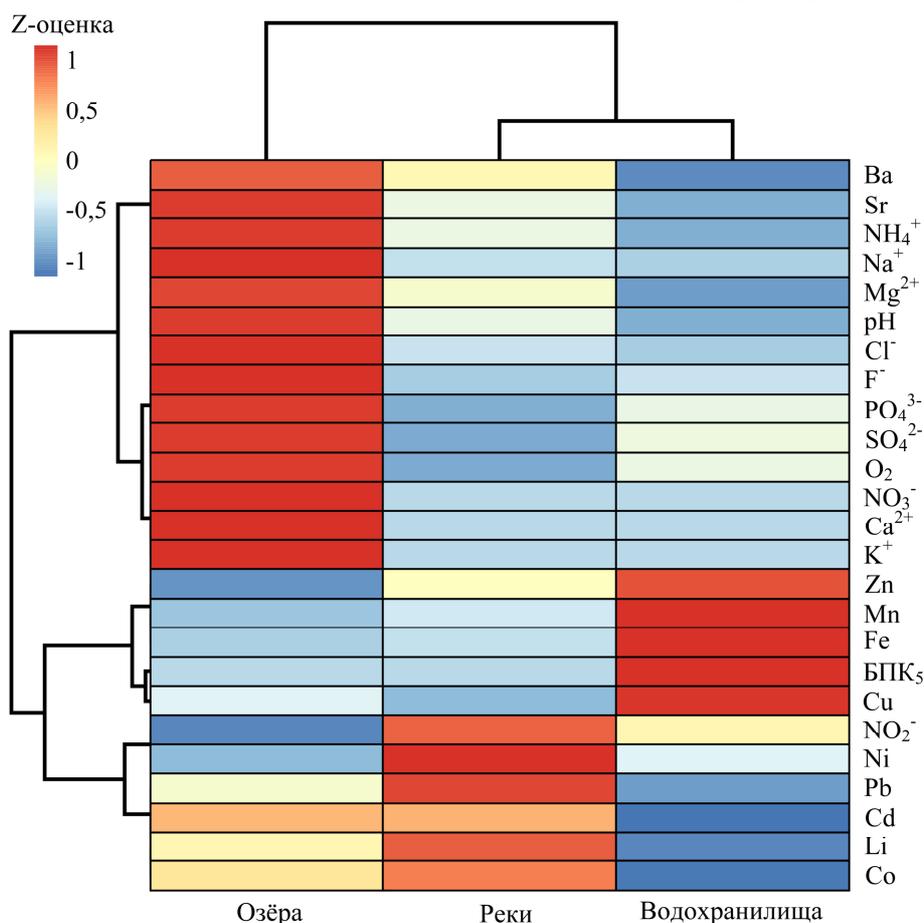


Рисунок 2 – Кластерная тепловая карта частоты превышения показателями химического состава воды ПДК<sub>ВР</sub> в озёрах, реках и водохранилищах Урала

Она указала на большее сходство рек и водохранилищ по паттернам показателей с превышениями нормативов, а также позволила выделить наиболее характерные для каждого типа водоёмов проблемы (см. вывод № 1). Выявленное наилучшее качество воды в искусственных водоёмах было отчасти неожиданным, поскольку в литературе широко обсуждаются экологические проблемы именно водохранилищ. Полученный результат указывает на необходимость вдумчивого законодательного регулирования рыбохозяйственного использования уральских водохранилищ, поскольку в последнее десятилетие на многих из них рыбоводная деятельность была прекращена.

Сезонные изменения состава и качества воды рассмотрены на примере Южноуральского водохранилища, а пространственные изменения – на примере оз. Сугояк с применением многомерных методов. Результаты приборного биотестирования ряда водохранилищ по реакции хемотаксиса парамеций указали на токсичность воды в водохранилищах-охладителях ГРЭС – Троицком (индекс токсичности  $I_{\text{токс.}} = 0,63$ ) и Южноуральском (0,39) – относительно Аргазинского (-0,02), Шершнёвского (0,09) и Магнитогорского (0,14).

### 2.2.2 Содержание тяжёлых металлов в донных отложениях

Проведён анализ данных по содержанию 8-10 ТМ в 9 озёрах, 14 реках и 10 искусственных водоёмах. Критерий Фридмана с расчётом конкордации Кендалла выявил сильную и высоко статистически значимую согласованность в ранжировании элементов в водоёмах разного типа (рисунок 3).

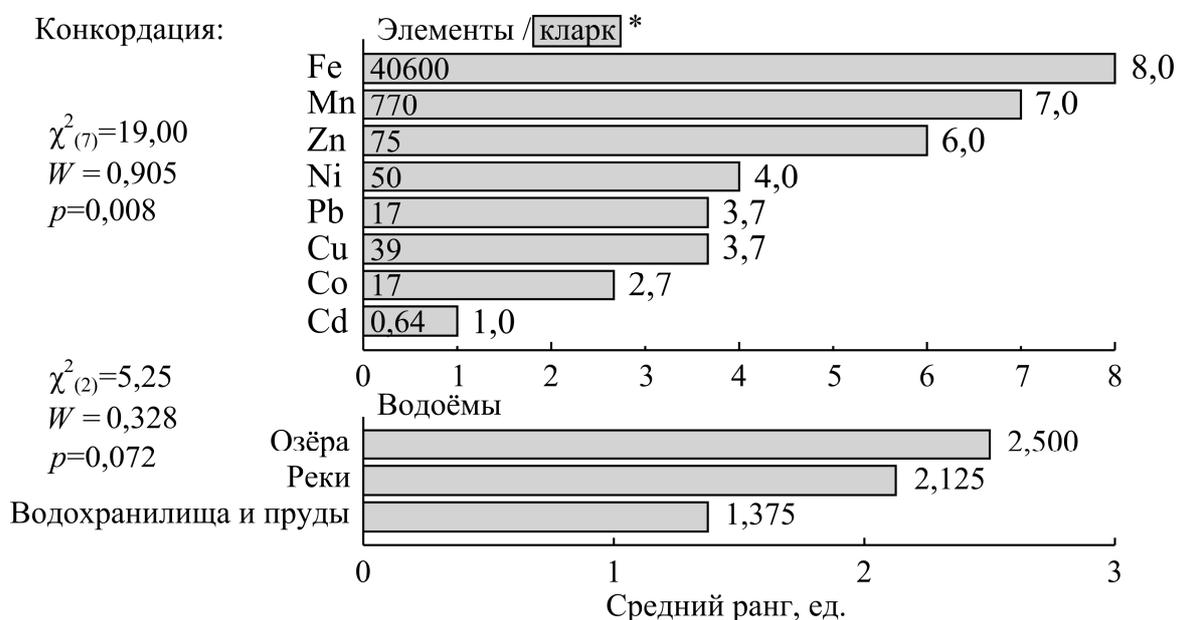


Рисунок 3 – Ранжирование элементов и водоёмов по концентрации тяжёлых металлов в донных отложениях уральских водоёмов. \* Кларк для верхней части континентальной коры по А. Н. Григорьеву (2009).

За исключением Pb ранги соответствовали положению кларков для верхней части континентальной коры. Конкордация водоёмов по содержанию 8 ТМ в ДО была существенно ниже, что указывает на специфическое накопление ТМ водоёмами разного типа, однако позволяет говорить о тенденции к большему накоплению металлов в озёрах, промежуточному – в реках, минимальному – в водохранилищах и прудах.

Поскольку распределение ТМ в ДО варьировало в широких пределах и не подчинялось нормальному распределению, далее для ряда задач использовалось адаптивное к данным степенное преобразование Бокса – Кокса, максимально приближающее распределение к нормальному. После его применения была обнаружена полимодальность распределения ТМ в ДО на гистограммах, а после

разделения смеси этих распределений с помощью *EM*-алгоритма были получены границы для отделения первой группы условно «чистых» водоёмов от остальных. В результате были получены следующие естественные границы для выделения относительно чистых и загрязнённых водоёмов (в мг/кг сухого вещества): Mn – 48,9; Fe – 12433; Co – 1,75; Ni – 23,1; Cu – 214,2; Zn – 24,1; Cd – 0,14 или 0,91; Pb – 43,0. В условиях отсутствия нормативов для содержания ТМ в ДО предлагается использовать данные значения в качестве региональных ориентиров. Их условность обсуждается в разделе анализа результатов в связи с появлением большого числа методик анализа ТМ в ДО.

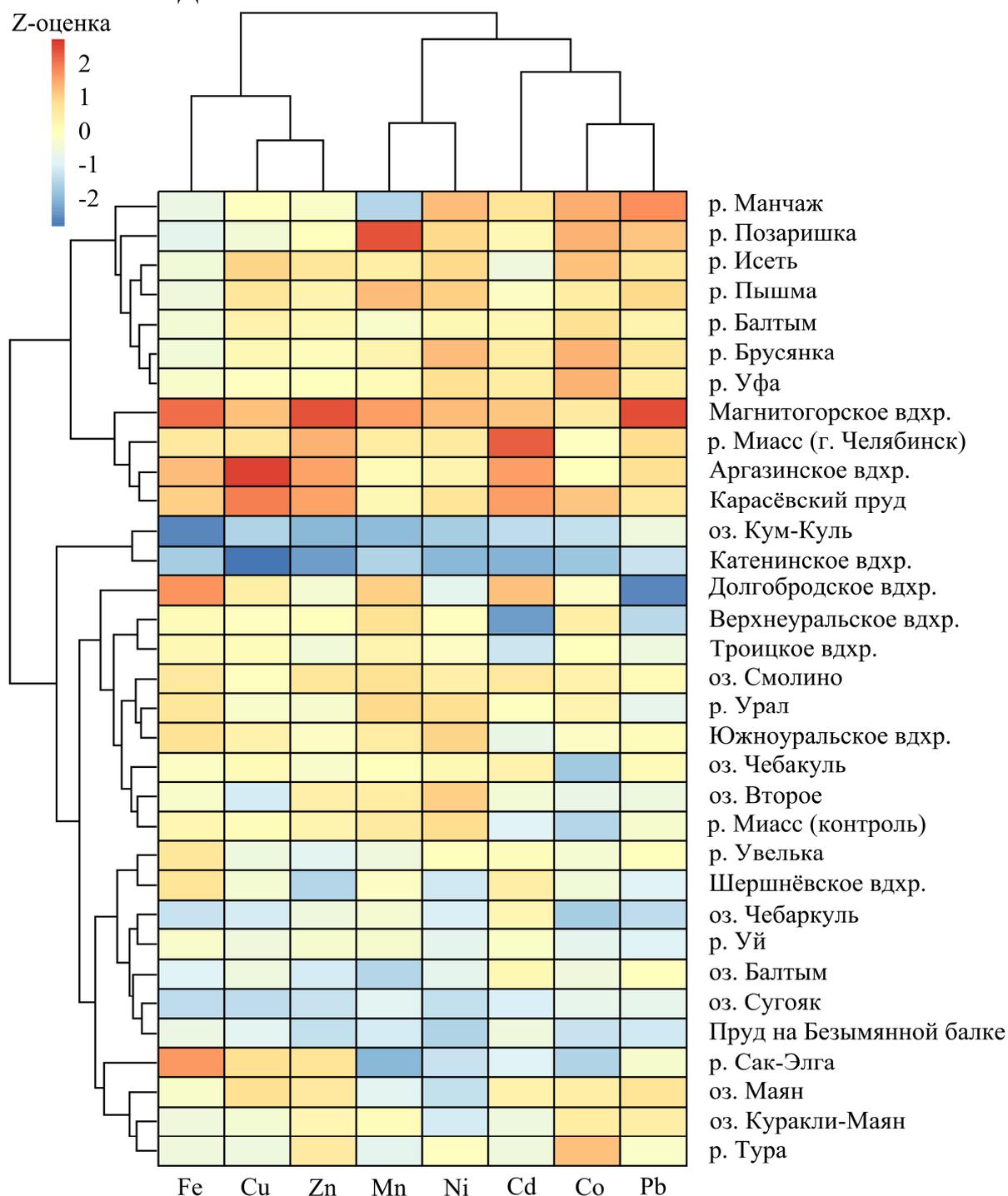


Рисунок 4 – Кластерная тепловая карта группировки водоёмов и тяжёлых металлов по их концентрации в подвижной фракции донных отложений

Преобразованные по Боксу – Коксу значения использовались также для построения кластерной тепловой карты, что позволило выстроить более плавные цветовые градиенты и визуализировать ряд закономерностей (рисунок 4). Первым самостоятельным кластером выделилась ассоциация Fe–Cu–Zn, рассматриваемая обычно как группа биофильных элементов. Учитывая максимальные её концентрации в техногенно загрязнённых водоёмах (Магитогорское водохранилище находится в зоне влияния Магнитогорского металлургического комбината, Аргазинское водохранилище, Карасёвский пруд и р. Сак-Элга – в зоне влияния Карабашского медеплавильного комбината, р. Миасс – в черте промышленного мегаполиса – г. Челябинска) данный паттерн интерпретируется как техногенные элементы в составе органического вещества. Меньшее содержание элементов данного паттерна установлено для рек Свердловской области, водохранилищ Челябинской области, ряда чистых озёр с рекреационной нагрузкой (Чебаркуль, Балтым, Сугояк), и контрольного водоёма (Пруд на Безымянной балке). Минимальные содержания ТМ отмечены в ДО оз. Кум-Куль – с песчаным дном и низким содержанием сапропелей, и в ДО Катенинского водохранилища – самого молодого (с 2015 г.) водохранилища Челябинской области, вероятно, не успевшего накопить органическое вещество в заметных концентрациях.

Второй кластер ТМ сформировали Mn, Ni, Cd, Co, Pb. В нём пара Ni–Co является геохимической ассоциацией элементов уральских кор выветривания гипербазитов, а Pb–Cd – по собственным и литературным данным – техногенная автотранспортная ассоциация. Mn, как более биофильный элемент, связанный с органическим веществом, занимает в этом кластере самое крайнее положение. Элементов данного кластера больше всего в реках и в группе техногенно загрязнённых водоёмов. В целом, анализ рисунка 4 позволяет отметить закономерность, что наиболее отчётливо выделяются не природные особенности водоёмов, а антропогенные воздействия, что является аргументом в пользу высокой информативности анализа ДО для выявления техногенного загрязнения.

В мониторинге экологического состояния водоёмов с использованием сведений о ДО помимо ориентира на предложенные граничные значения и графические схемы могут быть полезны ещё 2 подхода, рассматриваемые в подразделах 2.2.2.1 и 2.2.2.2. Во-первых, это информация о доле подвижной фракции ТМ в валовом содержании. Малая доля подвижной фракции может указывать на нахождение элемента в составе техногенных малорастворимых материалов (золы уноса, силикатные микросферы, ферросферы), что рассмотрено на примерах ДО хорошо изученных Троицкого, Магнитогорского водохранилищ и водоёмов зоны влияния Карабашского медеплавильного комбината. Во-вторых, важна информация, получаемая с использованием многомерных техник, позволяющих обнаруживать парагенетические ассоциации элементов, объединяемых общностью происхождения и потому изменяющихся по акватории водоёмов скоррелировано. Выделение и интерпретация таких паттернов рассмотрена на нескольких примерах. На примере двух водохранилищ ГРЭС и контрольного водоёма показана возможность выделения паттернов металлов ГРЭС и пелитовой фракции состава ДО даже на малых выборках ( $n=10-13$ ). Как видно из рисунка 5, техногенный фактор работавших на высокосольных углях ГРЭС в обоих

случаях включает Pb и Fe, что согласуется с данными других исследователей. Также в двух случаях прослеживается, в Троицком водохранилище – выделяется в самостоятельный фактор ассоциация почвенных элементов с парой Ni–Co, наследуемая от древних уральских кор выветривания. Если прибегнуть к аргументу Арбатнота, то вероятность случайного расположения по соседству векторов Ni и Co на всех трёх факторных диаграммах следует признать малой: она составит  $(2/6)^3 = 0,037$ , что меньше принятого в натуральных исследованиях 5%-ного порога справедливости нулевой гипотезы ( $p < 0,05$ ).

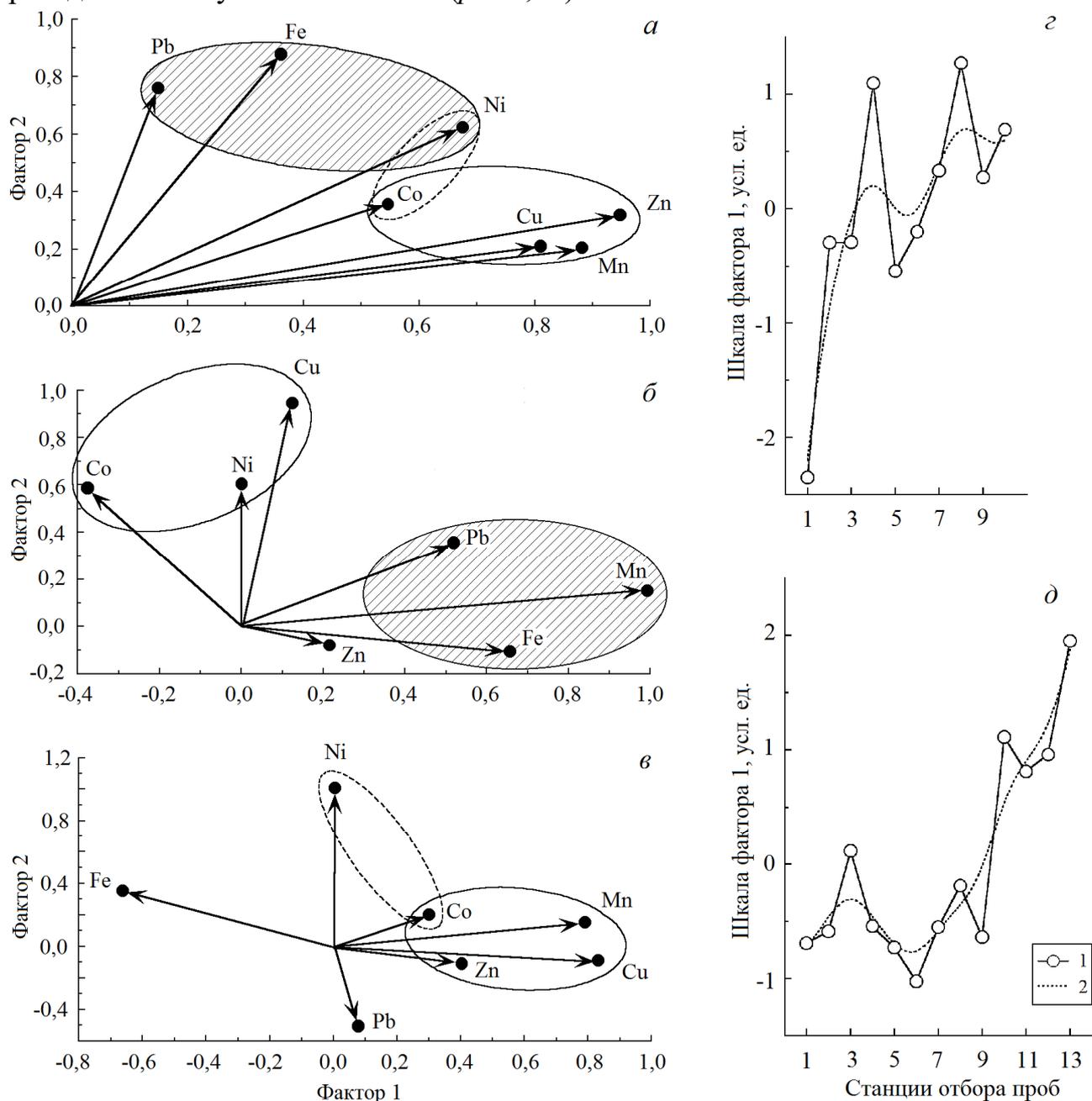
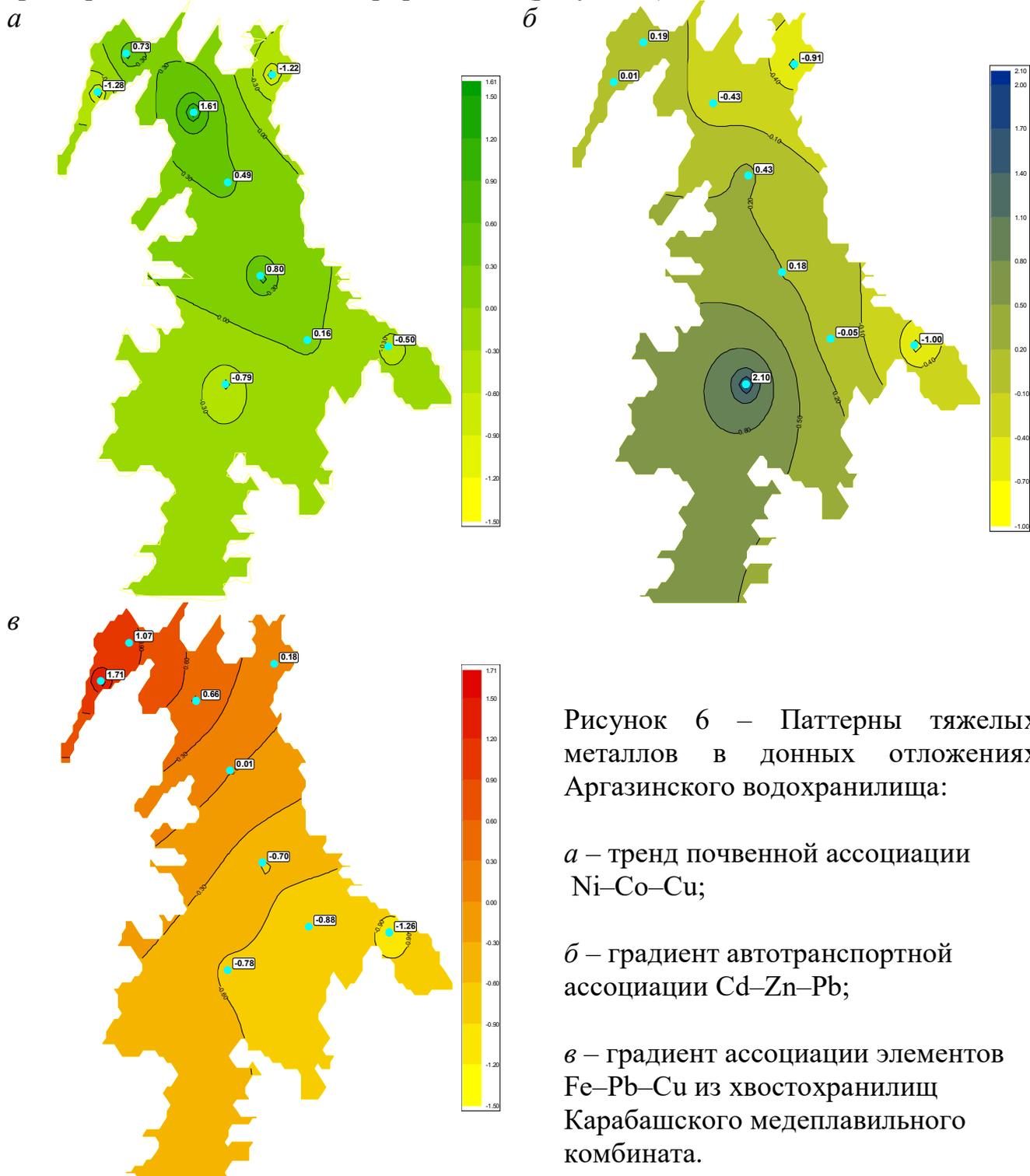


Рисунок 5 – Ординационные диаграммы содержания металлов в Южноуральском (а), Троицком (б) и Верхнеуральском (в) водохранилищах и динамика изменения фактора органического вещества пелитовой фракции в продольном разрезе Южноуральском (д) и Верхнеуральского (е) водохранилищ. Штриховкой выделены паттерны металлов ГРЭС. 1 – расчётные значения факторных шкал, 2 – сглаженные сплайном зависимости.

Существенно большие возможности для обнаружения устойчивых ассоциаций элементов в составе ДО и выявления факторов экологического риска для водоёмов даёт сочетание многомерных методов с пространственной интерполяцией полученных факторных меток на картах акваторий. Этот приём демонстрируется на примере оз. Сугояк и Аргазинского водохранилища. В первом случае 3 выделенные главные компоненты были интерпретированы как интегральное загрязнение крупным прибрежным посёлком, локальное загрязнение невыявленной природы (можно использовать эту информацию для дальнейших исследований) и ветровой снос Mn, Pb и Cd в составе альгофлоры. В Аргазинском водохранилище выделяются 3 фактора, с однозначной интерпретацией (рисунок 6).



Важно, что получаемая таким образом информация может быть использована для принятия управленческих решений. Так, ясно, что в последнем случае не имеет смысла бороться с естественными почвенными элементами, даже если ПДК воды по ним будет превышена. Накопленные за десятилетия техногенные элементы также не могут быть устранены без спуска водохранилища. Однако можно обеспечить специальный режим пропуска отдыхающих в популярную южную часть водоёма для предотвращения дальнейшего его загрязнения автотранспортными поллютантами.

Использованный нами многомерный подход может быть применён также к опубликованным табличным данным с получением самостоятельных интерпретаций особенностей процесса седиментогенеза. В озёрах Алабуга, Уфимское и Серебры выделены 2 полностью идентичных паттерна металлов: 1) элементы Карабашского медеплавильного комбината Pb–Zn–Cu и 2) почвенные уральские Ni–Co–Cr.

### **2.2.3 Комплексная оценка экологического и ветеринарного состояния популяций промысловых рыб**

Результаты ихтиопатологических исследований плотвы и окуня из ряда водоёмов, указывают на типичную для водоёмов Урала паразитологическую ситуацию с преобладанием в структуре заболеваний диплостомозов (с экстенсивностью до 100%) и тетракотилёза (до 90%). Карантинные зооантропонозные инвазии были отмечены дважды: псевдамфитамоз у 1 экз. плотвы из Троицкого водохранилища и дифиллоботриоз у пеляди из Южноуральского водохранилища (экстенсивность – 100%, интенсивность – 20 и более паразитов). Из потенциально опасных для человека гельминтов в плотве оз. Треугольное (пойма р. Уй) обнаружена трематода *Paracoenogonimus ovatus* (Katsurada, 1914), паразитирующая у животных и способная передаваться человеку. Обращено внимание на проблему создания инвазионных коридоров между разными водными бассейнами. Так, соединение водным каналом Долгобродского водохранилища (Волжский бассейн) и Аргазинского водохранилища (Обь-Иртышский бассейн) может представлять опасность с точки зрения появления и распространения новых для устоявшихся водных систем инвазий.

На основании выявленных цитогенетических и цитотоксических нарушений у плотвы и леща из ряда водоёмов (рисунок 7), установлено, что максимальный уровень клеток с микроядрами наблюдался у плотвы из Южноуральского водохранилища (таблица 2). В отличие от водоёма-охладителя Троицкой ГРЭС, оно имеет в 3 раза меньший коэффициент водообмена (3,0), стабильно повышенный уровень биогенных соединений, включая органическое вещество и нитриты, неблагоприятный кислородный режим, а также несвязанные с деятельностью ГРЭС токсиканты в составе воды, в частности – мышьяк. Доказано, что у плотвы в Южноуральском водохранилище был максимален уровень эритроцитов не только с микроядрами, но также с пикнозом, пойкилоцитозом и смещением ядра. Это дало основание предполагать согласованное изменение в данном и других водоёмах

сразу комплекса нарушений. Это было подтверждено с помощью анализа главных компонент, который дал основания предполагать общность механизмов образования инвагинации ядра и амитозов, а также пикноза и смещений ядра. Аналогичные сведения и анализы приведены в работе для популяций леща, имевших свою специфику.

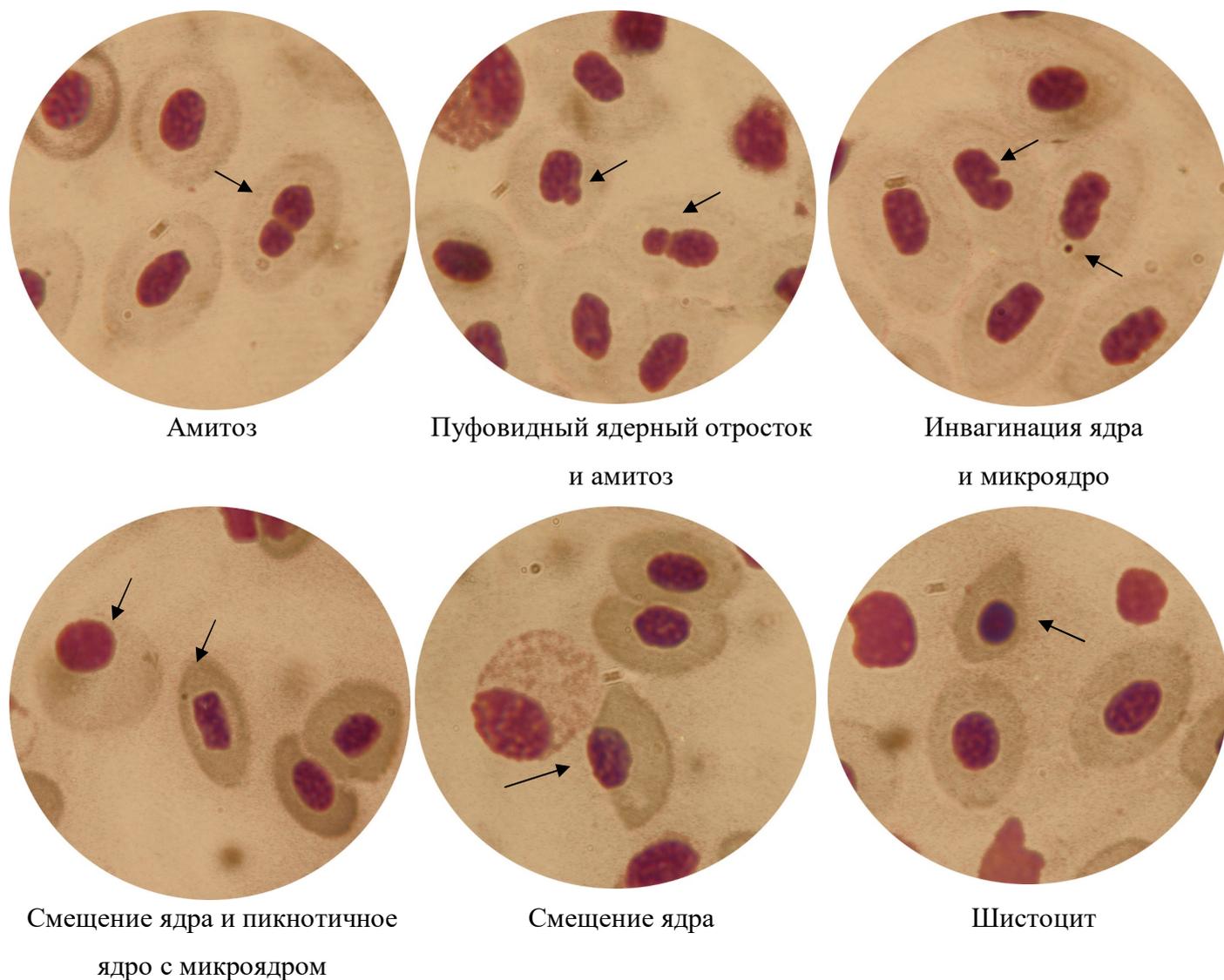


Рисунок 7 – Нарушения ядра и цитоплазмы в эритроцитах плотвы и леща

В целом результаты эколого-генетического мониторинга ряда уральских озёр и водохранилищ указали на наиболее благополучную ситуацию в контрольном Верхнеуральском водохранилище, которая отмечалась как для популяции плотвы, так и леща. Что касается наиболее неблагоприятного водоёма, то результаты, полученные на двух видах рыб, были неоднозначными: стабильно высокий уровень нарушений наблюдался у рыб в неподверженном техногенному загрязнению озере Большой Сунукуль. И плотва, и лещ Троицкого водохранилища имели самые высокие уровни специфического нарушения ядра – ядерных отростков.

Таблица 2 – Частота нарушений ядра и цитоплазмы эритроцитов периферической крови плотвы из уральских водоёмов, в % [95% ДИ]. Тест статистической значимости различий – *H*-критерий Краскела – Уоллиса.

Оз. Б. Кисегач ( <i>n</i> =12, <i>N</i> =20700)	Оз. Б. Сунукуль ( <i>n</i> =27, <i>N</i> =48000)	Верхнеураль- ское вдхр. ( <i>n</i> =15, <i>N</i> =27000)	Троицкое вдхр. ( <i>n</i> =9, <i>N</i> =18000)	Шершнёвское вдхр. ( <i>n</i> =4, <i>N</i> =8000)	Южноураль- ское вдхр. ( <i>n</i> =12, <i>N</i> =39000)
Микроядра мелкие ( $H_{(5)}=30,94; p<0,001$ )					
14,0 [9,7; 18,7]	12,4 [9,9; 14,9]	5,4 [2,5; 9,7]	4,2 [2,7; 5,7]	4,0 [2,7; 5,1]	21,2 [13,9; 28,7]
Микроядра крупные ( $H_{(5)}=20,25; p=0,001$ )					
1,38 [0,78; 2,08]	1,19 [0,83; 1,59]	0,57 [0,23; 0,97]	0,17 [0,01; 0,33]	0,63 [0,13; 1,25]	2,41 [1,33; 3,63]
Микроядра всего ( $H_{(5)}=32,83; p<0,001$ )					
15,3 [10,8; 20,3]	13,5 [11,0; 16,1]	6,0 [2,8; 10,5]	4,3 [2,8; 5,9]	4,6 [3,3; 5,5]	23,6 [15,7; 31,8]
Амитоз ( $H_{(5)}=11,12; p=0,049$ )					
0,67 [0,17; 1,25]	1,74 [0,65; 3,37]	0,87 [0,47; 1,33]	0,11 [0,01; 0,28]	0,50 [0,01; 1,00]	0,21 [0,01; 0,46]
Инвагинация ядра ( $H_{(5)}=12,44; p=0,029$ )					
3,8 [1,9; 5,9]	4,7 [2,8; 7,5]	1,4 [0,5; 2,4]	1,4 [0,7; 2,2]	6,3 [3,3; 10,4]	3,8 [1,3; 7,8]
Пикноз ядра ( $H_{(5)}=6,02; p=0,305$ )					
15,4 [7,2; 25,5]	23,4 [17,8; 29,5]	16,0 [10,7; 21,7]	20,6 [12,6; 29,1]	13,0 [9,8; 16,8]	35,2 [15,6; 63,4]
Пойкилоцитоз ( $H_{(5)}=12,40; p=0,030$ )					
0,29 [0,04; 0,67]	0,43 [0,17; 0,78]	0,83 [0,13; 1,67]	0,50 [0,17; 0,83]	0,38 [0,01; 0,75]	3,25 [1,33; 5,67]
Смещение ядра ( $H_{(5)}=20,66; p<0,001$ )					
5,6 [4,2; 7,0]	9,4 [7,0; 12,1]	6,9 [3,3; 11,9]	8,8 [5,6; 14,3]	8,8 [5,8; 12,0]	15,5 [10,4; 23,0]
Ядерные отростки ( $H_{(5)}=14,80; p=0,011$ )					
0,54 [0,25; 0,88]	0,63 [0,37; 0,94]	0,07 [0,01; 0,20]	1,61 [0,50; 0,83]	0,25 [0,01; 0,75]	0,71 [0,17; 1,33]

Примечание. *n* – количество экземпляров рыбы, *N* – количество изученных клеток.

Поскольку плотва и окунь обитали в большинстве изученных водоёмов, именно эти два вида были выбраны для анализа уровней накопления ТМ. В таблицах 3-4 приведены концентрации ТМ в мышечной ткани рыб этих видов, а в диссертации также представлены данные для костной ткани.

Для выявления наиболее общих закономерностей в полученном массиве информации было проведено ранжирование элементов по уровням накопления металлов в тканях рыб, а также предпринят поиск корреляций между концентрацией металлов в воде и в тканях рыб (рисунок 8).

Таблица 3 – Содержание металлов в мышечной ткани плотвы из уральских водоёмов, мг/кг сухого вещества. Среднее значение [95% ДИ].

Водоём \ Элемент	Mn	Fe	Co	Ni
оз. Сугояк (n=6)	4,25 [2,46; 6,19]	27,05 [8,12; 61,59]	3,02 [2,44; 3,57]	0,89 [0,48; 1,43]
оз. Чебакуль (n=10)	0,46 [0,35; 0,57]	9,73 [7,83; 11,94]	2,55 [1,26; 4,58]	0,64 [0,27; 1,03]
оз. Чебаркуль (n=10)	5,93 [3,42; 9,30]	11,56 [8,59; 15,14]	1,17 [0,80; 1,66]	1,67 [1,12; 2,29]
р. Миасс (n=10)	3,54 [2,47; 4,93]	32,36 [25,04; 42,01]	1,01 [0,68; 1,48]	3,15 [1,97; 4,68]
Аргазинское вдхр. (n=11)	1,00 [0,77; 1,25]	21,02 [8,45; 35,30]	0,13 [0,11; 0,15]	0,39 [0,24; 0,54]
Магнитогорское вдхр. (n=10)	3,74 [1,85; 5,87]	14,81 [10,63; 18,96]	0,92 [0,39; 1,49]	1,67 [0,85; 2,62]
Троицкое вдхр. (n=4)	0,71 [0,68; 0,74]	4,50 [3,47; 5,43]	0,38 [0,26; 0,50]	0,27 [0,22; 0,31]
Шершнёвское вдхр.	0,38 [0,31; 0,46]	2,30 [1,83; 2,76]	0,20 [0,19; 0,21]	0,08 [0,08; 0,09]
Южноуральское вдхр. (n=5)	1,72 [1,38; 2,15]	94,21 [40,84; 188,71]	0,45 [0,39; 0,51]	2,06 [1,63; 2,49]
Пруд на Безымянной балке (n=10)	1,46 [1,20; 1,78]	7,49 [6,74; 8,25]	1,09 [0,71; 1,51]	0,52 [0,36; 0,70]
Значимость различий*	$H_{(9)}=65,99$ $p<0,001$	$H_{(9)}=52,58$ $p<0,001$	$H_{(9)}=64,55$ $p<0,001$	$H_{(9)}=58,59$ $p<0,001$
Водоём \ Элемент	Cu	Zn	Cd	Pb
оз. Сугояк (n=6)	0,64 [0,41; 0,99]	26,87 [24,33; 29,88]	0,09 [0,05; 0,13]	1,03 [0,42; 1,79]
оз. Чебакуль (n=10)	0,74 [0,62; 0,85]	29,56 [24,24; 35,51]	0,74 [0,44; 1,20]	1,03 [0,69; 1,54]
оз. Чебаркуль (n=10)	0,92 [0,70; 1,18]	12,36 [10,23; 14,37]	0,42 [0,27; 0,61]	< 0,25 –
р. Миасс (n=10)	1,49 [1,15; 1,87]	19,43 [14,91; 26,35]	0,15 [0,09; 0,22]	1,06 [0,73; 1,46]
Аргазинское вдхр. (n=11)	0,94 [0,80; 1,11]	6,13 [5,23; 7,03]	<0,18 –	0,83 [0,69; 0,99]
Магнитогорское вдхр. (n=10)	1,21 [0,71; 1,80]	17,47 [12,71; 22,34]	0,17 [0,08; 0,28]	0,54 [0,17; 0,93]
Троицкое вдхр. (n=4)	0,19 [0,16; 0,22]	8,46 [7,38; 9,54]	0,04 [0,04; 0,04]	0,93 [0,84; 0,99]
Шершнёвское вдхр.	1,24 [0,76; 1,78]	4,06 [3,21; 4,80]	<0,28 –	1,30 [1,10; 1,47]
Южноуральское вдхр. (n=5)	0,66 [0,34; 1,06]	34,92 [29,11; 42,51]	1,58 [1,48; 1,68]	0,32 [0,25; 0,42]
Пруд на Безымянной балке (n=10)	0,65 [0,45; 0,89]	13,20 [11,98; 14,41]	0,75 [0,57; 0,94]	< 0,25 –
Значимость различий*	$H_{(9)}=30,11$ $p<0,001$	$H_{(9)}=68,30$ $p<0,001$	$H_{(9)}=75,16$ $p<0,001$	$H_{(9)}=58,47$ $p<0,001$

\* Здесь и далее различия рассчитаны по  $H$ -критерию Краскела – Уоллиса

Таблица 4 – Содержание металлов в мышечной ткани окуня из уральских водоёмов, мг/кг сухого вещества. Среднее значение [95% ДИ].

Водоём \ Элемент	Mn	Fe	Co	Ni
оз. Сугояк (n=6)	6,51 [6,03; 7,01]	16,67 [11,74; 22,08]	5,21 [4,07; 6,26]	1,16 [0,67; 1,87]
оз. Чебакуль (n=10)	0,97 [0,78; 1,15]	10,60 [8,22; 13,10]	3,53 [2,62; 4,73]	0,45 [0,39; 0,55]
оз. Чебаркуль (n=10)	10,73 [3,78; 23,30]	25,47 [19,15; 32,15]	1,50 [1,17; 1,88]	2,42 [1,44; 3,59]
р. Миасс (n=9)	8,47 [5,69; 11,62]	26,04 [17,10; 37,38]	1,17 [0,87; 1,52]	3,85 [2,75; 5,07]
Аргазинское вдхр. (n=10)	1,42 [0,97; 2,01]	3,07 [2,33; 4,14]	0,16 [0,11; 0,21]	0,86 [0,59; 1,27]
Магнитогорское вдхр. (n=10)	2,45 [1,94; 2,98]	16,01 [11,78; 21,90]	0,44 [0,37; 0,53]	1,01 [0,85; 1,19]
Троицкое вдхр. (n=4)	0,94 [0,84; 1,04]	10,61 [8,94; 12,28]	0,27 [0,12; 0,42]	0,34 [0,20; 0,48]
Южноуральское вдхр. (n=5)	5,93 [4,33; 7,74]	33,61 [24,48; 44,95]	0,95 [0,75; 1,19]	2,41 [1,83; 2,99]
Пруд на Безымянной балке (n=10)	2,55 [1,93; 3,27]	7,83 [6,89; 8,70]	0,83 [0,58; 1,08]	0,62 [0,44; 0,81]
Значимость различий	$H_{(8)}=55,65$ $P<0,001$	$H_{(8)}=54,46$ $P<0,001$	$H_{(8)}=61,78$ $P<0,001$	$H_{(8)}=52,61$ $P<0,001$
Водоём \ Элемент	Cu	Zn	Cd	Pb
оз. Сугояк (n=6)	0,58 [0,43; 0,76]	15,80 [12,70; 19,69]	0,16 [0,14; 0,19]	2,45 [1,55; 3,29]
оз. Чебакуль (n=10)	0,91 [0,71; 1,12]	33,32 [23,69; 45,42]	0,73 [0,61; 0,86]	1,68 [1,28; 2,11]
оз. Чебаркуль (n=10)	1,41 [1,06; 1,73]	15,10 [12,44; 17,82]	1,14 [0,70; 1,62]	< 0,25 –
р. Миасс (n=9)	0,80 [0,63; 0,98]	12,09 [10,32; 13,95]	0,10 [0,08; 0,13]	1,20 [0,88; 1,53]
Аргазинское вдхр. (n=10)	1,14 [0,90; 1,46]	3,35 [2,70; 4,00]	0,21 [0,15; 0,29]	1,53 [0,67; 2,69]
Магнитогорское вдхр. (n=10)	1,35 [1,00; 1,71]	11,81 [9,99; 13,80]	0,11 [0,09; 0,13]	0,23 [0,19; 0,29]
Троицкое вдхр. (n=4)	0,19 [0,14; 0,24]	5,80 [5,55; 6,23]	0,04 [0,04; 0,04]	0,66 [0,56; 0,76]
Южноуральское вдхр. (n=5)	1,68 [0,96; 2,62]	85,30 [13,96; 223,12]	0,33 [0,27; 0,40]	0,61 [0,43; 0,75]
Пруд на Безымянной балке (n=10)	0,63 [0,49; 0,79]	8,02 [6,87; 9,16]	0,88 [0,51; 1,34]	< 0,25 –
Значимость различий	$H_{(8)}=34,61$ $P<0,001$	$H_{(8)}=58,77$ $P<0,001$	$H_{(8)}=58,08$ $P<0,001$	$H_{(8)}=62,11$ $P<0,001$

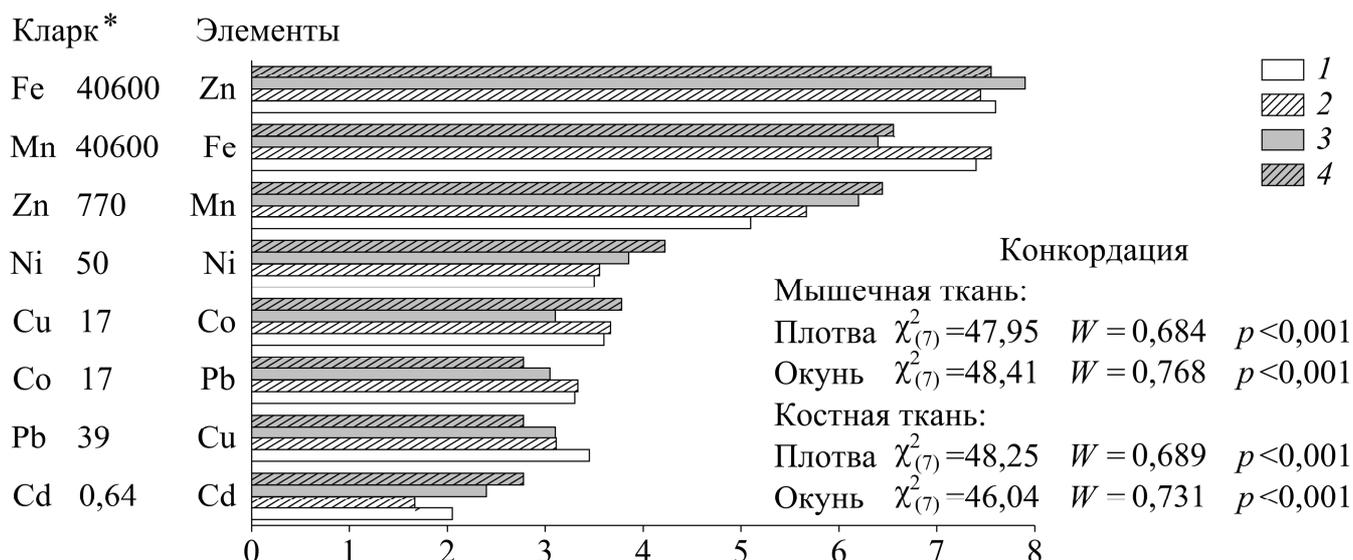


Рисунок 8 – Ранжирование элементов по концентрации в тканях рыб с оценкой конкорданции. Мышечная ткань: 1 – плотва, 2 – окунь; костная ткань, 3 – плотва, 4 – окунь. \* Кларк для верхней части континентальной коры по А.Н. Григорьеву (2009).

Был выявлен статистически значимый порядок ранжирования элементов по концентрации в тканях с высоким уровнем согласия для 2 видов и 2 тканей (рисунок 8). В целом, содержание металлов в рыбе соответствовало их распространению в верхней части континентальной коры Земли, но с двумя исключениями. Во-первых, Zn с позиции 3 кларка перемещается в рыбах на 1, что хорошо объяснимо химическим сходством с Ca: значительная часть Zn метаболизируется и откладывается подобно Ca. Во-вторых, имеется несоответствие в нижней части графика: Pb с 7 места поднимается на 6 (ранги Co и Cu равны в кларках и почти равны в рыбе). Полагаем, что поскольку Pb не имеет установленной биологической роли, данная ситуация характеризует именно последствия техногенного загрязнения: в предыдущих разделах было показано, что загрязнение свинцом на Урале широко распространено.

Сходные анализы по водоёмам с привлечением кластерных тепловых карт показали, что уровни накопления ТМ разными видами рыб в разных тканях отличались большой спецификой, что затрудняет однозначную констатацию степени загрязнения водоёма на основании данных по содержанию ТМ в мышечной и костной тканях. В поиске связи между содержанием ТМ в воде и ДО рассматриваемых водных объектов и их накоплением тканями рыб был проведён корреляционный анализ и построены графики зависимостей содержания ТМ в рыбе от её содержания в воде (рисунок 9). Из него видно, что для трёх элементов наблюдался сходный характер зависимостей у плотвы и окуня. Во-первых, имелась тенденция ( $p<0,10$ ) к положительной связи для свинца. Поскольку данный элемент неоднократно фигурировал в качестве свойственного уральским водоёмам ксенобиотика, мы склонны считать данную связь реальной и логичной. Если относиться к плотве и окуню как двум независимым объектам для проверки связи между концентрацией элемента в воде и в ткани, то можно объединить полученные вероятности по Фишеру и констатировать статистическую значимость этой связи:  $\chi^2_{(4)}=10,55$ ;  $p=0,032$ .

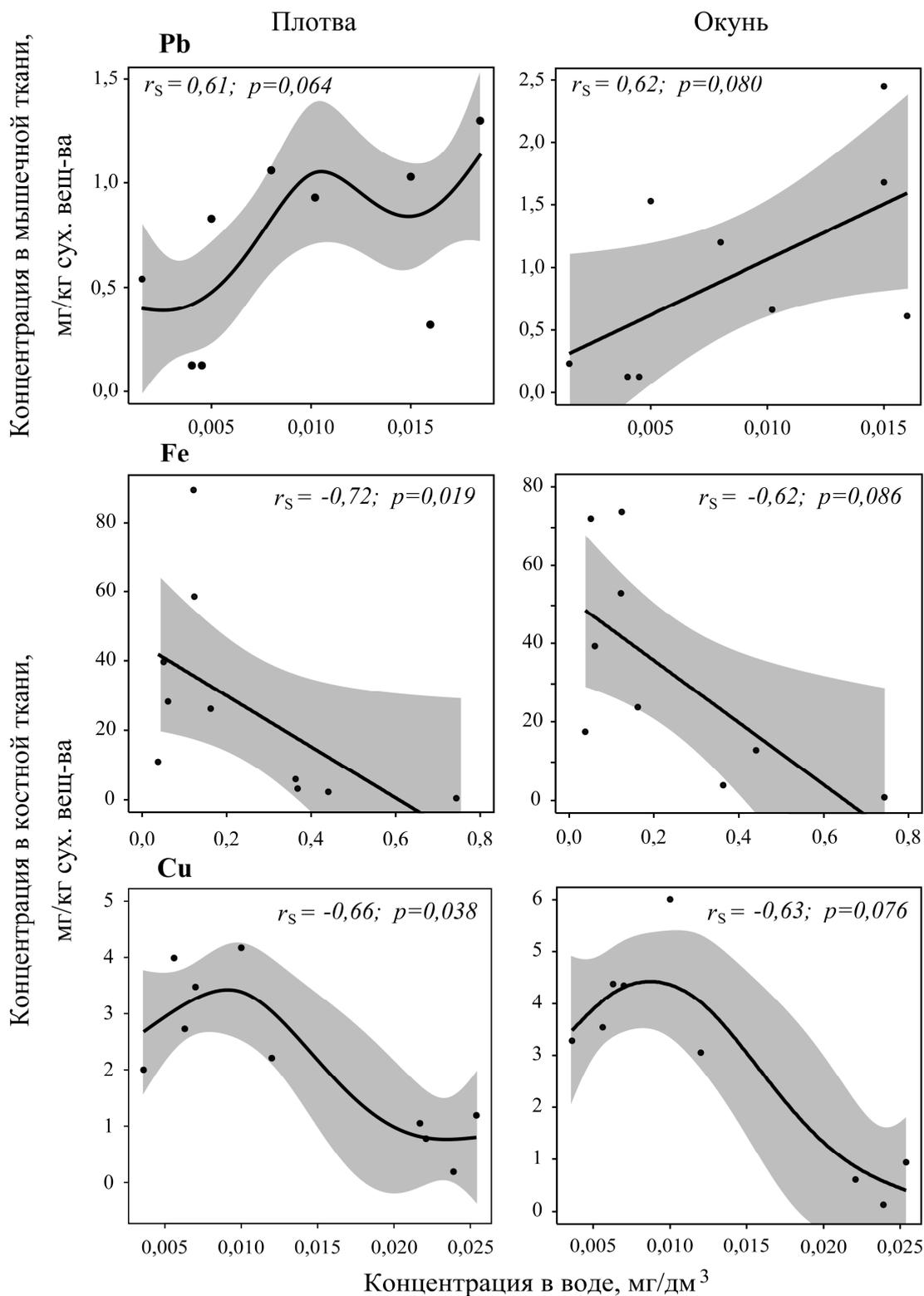


Рисунок 9 – Связь между концентрацией элемента в воде и в рыбе: коэффициент корреляции Спирмена  $r_s$  и оптимизированный сплайн зависимости с 95%-ной доверительной границей (серая область)

Для железа и меди наблюдалась обратная зависимость между концентрацией в воде и в костной ткани, причём она была статистически значимой для плотвы и для объединённых по Фишеру данных (для железа  $\chi^2_{(4)} = 12,83; p = 0,012$ , для меди  $\chi^2_{(4)} = 11,69; p = 0,020$ ). Поскольку оба этих металла, в отличие от свинца, являются

микроэлементами, сложный характер их метаболизма ожидаем. Более того, для Cu отрицательная связь между содержанием в водной среде и уровнем накопления рыбой известна по литературным обзорам. Таким образом, прямую связь между концентрацией в воде и рыбе удалось установить только для Pb ( $\chi^2_{(4)}=10,55$ ;  $p=0,032$ ), что согласуется полученными ранее данными о повышенных концентрациях этого элемента в уральских водоёмах и указывает на его потенциальную опасность для популяций рыб.

Поскольку выяснилось, что уровни накопления ТМ мышечной и костной тканями рыбы не могут использоваться напрямую для оценки биокондиции водоёмов, далее мы постарались найти другие подходы и техники, которые помогут обнаружить объяснимые паттерны наиболее биологически чуждых – ксенобиотичных – элементов, а также выстроить градиацию экологического благополучия водоёмов не по общему содержанию ТМ в организмах, а на иных принципах.

Первой такой техникой стало использования необъяснённой дисперсии концентраций ТМ для идентификации ксенобиотиков в экологических исследованиях. Его суть заключается в том, чтобы с использованием многомерных методов выразить и отделить влияние сильных биологических и/или экологических факторов от неконтролируемой случайной изменчивости. Применительно к рыбам такими сильными факторами могут быть видовые различия, тканевые, возрастные и половые различия, а применительно к водным системам – многолетняя динамика, сезонная изменчивость, особенности участков акватории или последовательно расположенных створов. Однако у остаточной изменчивости могут быть свои источники. Например, загрязнение часто имеет мозаичный или градиентный характер. В этом случае обитатели загрязнённого водоёма, даже в пределах вида или возрастной группы, будут немного отличаться уровнями содержания поллютантов, и такая изменчивость не будет связана с действием главных факторов, а будет обусловлена именно загрязнением. Аналогично и для самих водоёмов: если выразить и отделить от общей изменчивости гидрохимических показателей ту её часть, которая определяется многолетними трендами, сезонными и пространственными факторами, то остаточная изменчивость будет отражать действие локальных загрязнителей, разовых залповых сбросов поллютантов в водоём и т.п. Поэтому анализ остаточной изменчивости, а математически – необъяснённой дисперсии признаков – может быть полезен именно для выявления проблемных экологических показателей и их паттернов. Так с использованием двух многомерных методов было установлено (таблица 5), что изменчивость элементов Карабашского медеплавильного комбината не нашла достаточного объяснения ни тканевыми, ни видовыми особенностями накопления, однако Cu занимала 1-ое, Fe – 2-ое и Pb – 3-е место по доле необъяснённой дисперсии в RDA и выделились в самостоятельный паттерн ксенобиотиков (вместе с Ni и Cd) в CATPCA.

Второй техникой стало использование корреляционной адаптометрии (КА) для интегральной оценки качества водной среды для популяций рыб. Его суть заключается в том, что при действии стрессоров сумма абсолютных значений коэффициентов корреляции между признаками – вес корреляционного графа (ВКГ) – часто увеличивается, а в результате успешной адаптации – снижается.

Таблица 5 – Результаты многомерного анализа данных по содержанию металлов в тканях рыб Аргазинского водохранилища

Показатели	Анализ избыточности (RDA)				Нелинейный анализ главных компонент (САТРСА)			
	Канонические оси			Доля дисперсии**	Компоненты			Об- щность
	1	2	3		1	2	3	
Инструментальные переменные (регрессоры)								
Ткань	0,973*	0,228	0,031	–	0,945*	-0,001	-0,111	0,879
Вид:	–	–	–	–	0,026	-0,895*	0,202	0,657
Плотва	-0,228	0,974*	-0,005	–	–	–	–	–
Окунь	0,087	-0,489*	0,868*	–	–	–	–	–
Гибрид Р×С <sup>#</sup>	0,140	-0,485*	-0,863*	–	–	–	–	–
Металлы (отклики)								
Cr	0,805*	0,269*	0,048	0,722 <sup>(9)</sup>	0,871*	0,132	0,226	0,857
Mn	0,692*	-0,091	0,236	0,543 <sup>(6)</sup>	0,931*	0,019	0,146	0,889
Fe	-0,314*	0,369*	0,016	0,235 <sup>(2)</sup>	0,020	0,831*	0,285*	0,525
Co	0,531*	0,119	0,372*	0,434 <sup>(4)</sup>	0,846*	0,144	0,159	0,800
Ni	0,421*	-0,093	0,533*	0,470 <sup>(5)</sup>	0,632*	0,160	0,352*	0,665
Cu	0,066	-0,062	-0,162	0,034 <sup>(1)</sup>	0,134	-0,035	0,922*	0,477
Zn	0,399*	0,668*	0,016	0,605 <sup>(7)</sup>	0,663*	0,593*	-0,064	0,720
Sr	0,910*	0,061	-0,064	0,836 <sup>(10)</sup>	0,854*	-0,247	-0,114	0,741
Cd	0,786*	0,124	0,124	0,648 <sup>(8)</sup>	0,867*	0,069	0,303*	0,854
Pb	0,552*	0,075	0,205	0,305 <sup>(3)</sup>	0,816*	0,171	0,303*	0,784
Доля объясненной дисперсии, %	48,0	13,6	1,0	37,4	52,0	16,7	11,7	–

\* Выделены факторные нагрузки более 0,25; \*\* Доля дисперсии, объясненная набором инструментальных переменных-регрессоров. (№) – ранг доли необъяснённой инструментальными переменными дисперсии. # Гибрид Рипус × Сиг.

В классическом варианте КА известна в медицине и задействует физиологические показатели, тогда как нами данная техника была адаптирована для популяций рыб с использованием данных по содержанию микроэлементов и ТМ в тканях. Для сравнения популяций по величине ВКГ в программно-статистической среде R был разработан программный код, который вместе с комментариями приводится в Приложении Д диссертации. Для нахождения ВКГ и средней абсолютной корреляции в нём используется ранговая корреляция Спирмена, а выборочные сравнения проводятся с использованием псевдозначений ресэмплинг-техники складного ножа, которые, в отличие от реплик бутстрэпа, являются независимыми и могут анализироваться с помощью классического дисперсионного анализа. В результате было установлено, что различия между водоёмами по показателям КА были высоко статистически значимыми: для мышечной ткани  $F_{(7/122)}=3,35$ ;  $p=0,003$ , для костной  $F_{(7/122)}=7,15$ ;  $p<0,001$ . На рисунке 10 показана

иерархия водоёмов в порядке увеличения интегрального показателя среднего стресса в популяциях рыб.

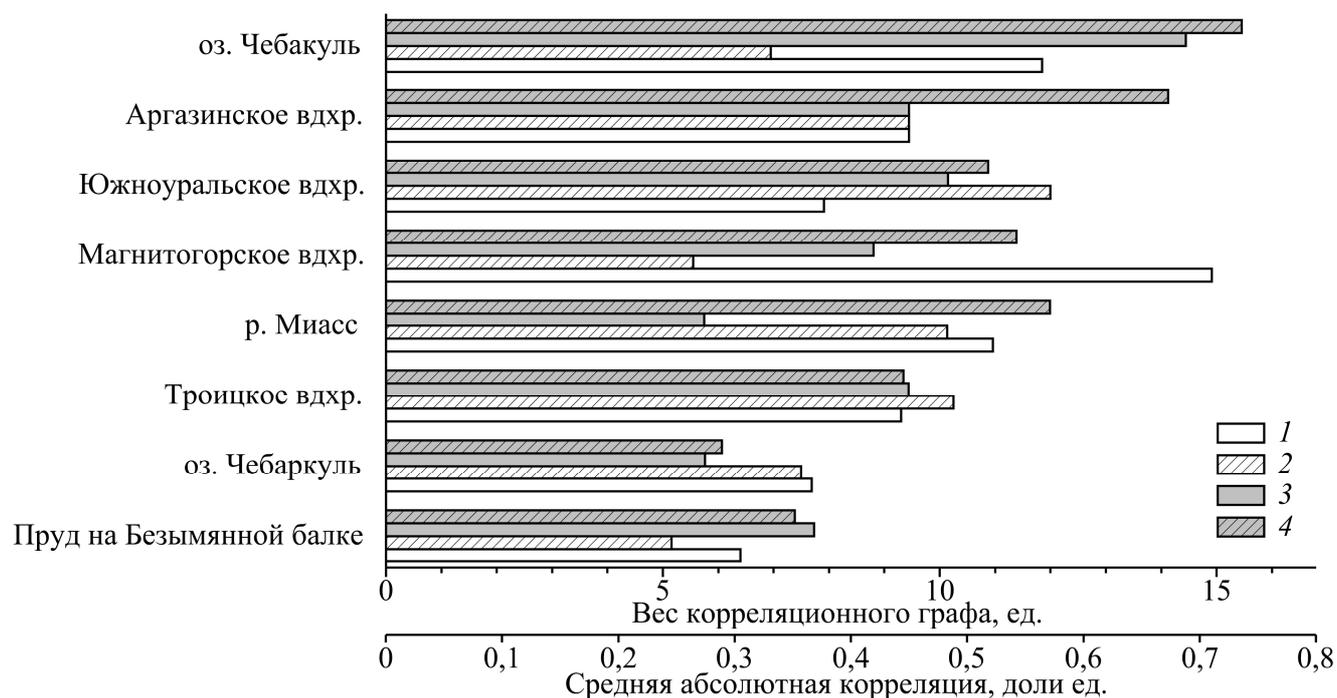


Рисунок 10 – Величина интегральной оценки биокондиции водной среды в популяциях рыб по показателям корреляционной адаптометрии. Мышечная ткань: 1 – плотва, 2 – окунь; костная ткань: 3 – плотва, 4 – окунь.

Видно, что полученное с применением методологии КА ранжирование водоёмов было логичным: минимальные значения отмечены в контрольном водоёме, высокие – в техногенно загрязнённых водохранилищах, максимальное – в водоёме с высокой естественной минерализацией воды. В работе обсуждается полезность методологии корреляционной адаптометрии для экологических исследований.

#### 2.2.4 Методы снижения концентрации токсикантов в рыбе, как объекте питания человека

В предыдущем разделе рыба рассматривалась как объект условий среды обитания, т.е. с экологической и ветеринарно-санитарной точек зрения. Но вместе с тем рыба является также объектом питания человека и источником важных и полезных для его здоровья веществ. В таблице 6 представлена информация об уровнях содержания нормируемых СанПиН 2.3.2.1078-01 для пищевых продуктов ТМ – Cd и Pb всех изученных видов рыб из всех водоёмов (Hg нами не изучалась, а по металлоиду As данные были отрывочными).

Из 45 выборок (16 водоёмов × разное число видов из них) превышения норматива по Cd в мышечной ткани отмечены дважды: для окуня из оз. Чебаркуль и плотвы из Южноуральского водохранилища (4,4% выборок). По Pb превышения

норматива отмечены также 2 раза (4,4%): у леща и щуки из Аргазинского водохранилища. По костной ткани ситуация была менее благополучной: превышения по Cd обнаружены в 16 случаях (35,6%), по Pb – также в 16 случаях (35,6%), но часто в других водоёмах или у других видов.

Таблица 6 – Содержание кадмия и свинца в тканях рыбы из уральских водоёмов, мг/кг сырого продукта (\* превышение норматива: Cd – 0,2 мг/кг, Pb – 1,0 мг/кг)

№ п/п	Вид	Мышечная ткань		Костная ткань	
		Cd	Pb	Cd	Pb
1	оз. Куракли-Маян				
	Карась <sup>1</sup> (n=5)	<0,008	0,25 [0,09; 0,39]	<0,022	1,34* [0,85; 1,77]
	С. карась <sup>2</sup> (n=5)	<0,009	0,16 [0,11; 0,21]	<0,041	1,19* [0,93; 1,49]
	Ротан (n=5)	<0,009	0,26 [0,15; 0,37]	<0,030	2,27* [1,34; 3,16]
2	оз. Маян				
	Карась (n=7)	<0,009	0,23 [0,02; 0,30]	<0,027	1,62* [0,96; 2,39]
	Песядь (n=7)	<0,009	0,31 [0,21; 0,38]	<0,028	1,47* [1,22; 1,65]
3	оз. Сугояк				
	Плотва (n=6)	0,018 [0,010;0,026]	0,21 [0,09; 0,36]	0,11 [0,07; 0,15]	3,00* [1,92; 4,51]
	Окунь (n=6)	0,032 [0,028;0,039]	0,50 [0,31; 0,67]	0,13 [0,11; 0,15]	4,09* [2,15; 6,26]
4	оз. Чебакуль				
	Плотва (n=10)	0,174 [0,103;0,282]	0,24 [0,16; 0,36]	0,67* [0,32; 1,14]	1,15* [0,58; 2,00]
	Окунь (n=10)	0,165 [0,137;0,194]	0,38 [0,29; 0,48]	1,20* [0,70; 2,05]	2,90* [1,57; 5,29]
5	оз. Чебаркуль				
	Плотва (n=10)	0,090 [0,058;0,131]	< 0,054	0,99* [0,78; 1,24]	<0,087
	Окунь (n=10)	0,225* [0,138;0,320]	<0,049	1,23* [0,84; 1,60]	<0,075
6	р. Исеть				
	Плотва (n=1)	<0,024	<1,51	<0,123	<7,40
	Окунь (n=2)	<0,016	<1,00	<0,064	<3,85
	Язь (n=2)	<0,018	<1,03	<0,070	<4,27
7	р. Миасс				
	Плотва (n=10)	0,034 [0,020;0,049]	0,24 [0,16; 0,33]	0,051 [0,039;0,065]	1,18* [0,93; 1,46]
	Окунь (n=9)	0,022 [0,018;0,028]	0,26 [0,19; 0,33]	0,094 [0,065;0,127]	1,36* [1,02; 1,79]
	Лещ (n=7)	0,057 [0,038;0,074]	0,54 [0,46; 0,62]	0,129 [0,099;0,165]	1,78* [1,55; 2,05]
8	р. Пышма				
	Ёрш (n=5)	<0,031	<1,88	<0,136	<8,19
9	Аргазинское водохранилище				
	Плотва (n=11)	<0,042 – 0,040	0,20 [0,16; 0,24]	0,74* [0,52; 0,99]	0,94 [0,77; 1,12]
	Окунь (n=10)	0,036 [0,026;0,049]	0,26 [0,11; 0,46]	0,65* [0,44; 0,88]	0,67 [0,43; 0,94]
	Лещ (n=2)	0,057	3,35*	0,434*	15,2*
	Щука (n=1)	0,028	2,39*	0,540*	41,0*
	Р×С <sup>3</sup> (n=10)	<0,064	0,10 [0,08; 0,12]	0,75* [0,57; 0,96]	0,98 [0,77; 1,24]
	Сиг (n=1)	0,060	0,09	0,430*	0,57

<sup>1</sup> Карась – здесь и далее – Золотой карась *Carassius carassius* (L., 1758); <sup>2</sup> С. карась – Серебряный карась *Carassius gibelio* (Bloch, 1782); <sup>3</sup> Р×С – гибрид Рипус × Сиг.

Таблица 6 – Продолжение

№ п/п	Вид	Мышечная ткань		Костная ткань	
		Cd	Pb	Cd	Pb
10	Верхнеуральское водохранилище (объединённая проба)				
	Плотва ( <i>n</i> =10)	0,033	0,32	0,10	0,32
	Окунь ( <i>n</i> =10)	0,036	0,16	0,05	0,24
	Ёрш ( <i>n</i> =10)	0,039	0,24	0,06	0,36
	Лещ ( <i>n</i> =10)	0,037	0,21	0,06	0,33
11	Магнитогорское водохранилище				
	Плотва ( <i>n</i> =10)	0,035 [0,016;0,058]	0,11 [0,03; 0,19]	0,10 [0,07; 0,15]	0,25 [0,15; 1,38]
	Окунь ( <i>n</i> =10)	0,023 [0,019;0,028]	0,05 [0,04; 0,06]	0,06 [0,04; 0,07]	0,18 [0,13; 0,22]
	Карась ( <i>n</i> =3)	0,040 [0,022;0,055]	0,05 [0,04; 0,07]	0,29* [0,06; 0,48]	0,09 [0,05; 0,11]
	Карп ( <i>n</i> =2)	0,021	0,070	0,46	0,056
12	Троицкое водохранилище				
	Плотва ( <i>n</i> =4)	0,009 [0,009;0,009]	0,21 [0,19; 0,22]	0,07 [0,06; 0,08]	0,32 [0,28; 0,37]
	Окунь ( <i>n</i> =4)	0,008 [0,008;0,008]	0,13 [0,11; 0,15]	0,06 [0,06; 0,07]	0,25 [0,19; 0,29]
	Ёрш ( <i>n</i> =4)	0,009 [0,009;0,009]	0,14 [0,08; 0,19]	0,07 [0,07; 0,07]	0,22 [0,15; 0,31]
	Судак ( <i>n</i> =4)	0,008 [0,008;0,008]	0,27 [0,26; 0,29]	0,05 [0,04; 0,05]	0,57 [0,54; 0,60]
	Щука ( <i>n</i> =4)	0,007 [0,007;0,007]	0,27 [0,26; 0,28]	0,05 [0,05; 0,05]	0,58 [0,55; 0,60]
	К.сомик <sup>4</sup> ( <i>n</i> =4)	0,008 [0,008;0,008]	0,27 [0,26; 0,28]	0,06 [0,05; 0,06]	0,63 [0,63; 0,64]
13	Шершнёвское водохранилище				
	Плотва ( <i>n</i> =10)	<0,060	0,28 [0,24; 0,32]	0,41* [0,34; 0,48]	1,37* [1,03; 1,73]
14	Южноуральское водохранилище				
	Плотва ( <i>n</i> =5)	0,35* [0,33; 0,38]	0,07 [0,06; 0,09]	0,60* [0,50; 0,68]	0,12 [0,10; 0,14]
	Окунь ( <i>n</i> =5)	0,067 [0,055;0,081]	0,12 [0,09; 0,15]	0,13 [0,10; 0,16]	0,11 [0,07; 0,16]
	Карп ( <i>n</i> =10)	0,036 [0,030;0,044]	0,83 [0,72; 0,93]	0,39* [0,35; 0,42]	4,80* [4,47; 5,10]
15	Пруд на Безымянной балке				
	Плотва ( <i>n</i> =10)	0,174 [0,132;0,218]	< 0,058	0,54* [0,33; 0,82]	<0,087
	Окунь ( <i>n</i> =10)	0,173 [0,100;0,263]	< 0,049	0,85* [0,64; 1,07]	<0,091
16	Пруд Девичьи слёзы (объединённая проба трёх возрастных групп)				
	Ротан ( <i>n</i> =15)	0,012	0,186	0,035	0,499

<sup>4</sup> К. сомик – Канальный сомик *Ictalurus punctatus* (Rafinesque, 1818).

Совпадения имелись для плотвы и окуня из минерализованного озера Чебакуль, для леща и щуки из Аргазинского водохранилища, для плотвы из Шершнёвского водохранилища и карпа из Южноуральского водохранилища. В обзоре литературы отмечалось, что Pb часто накапливается именно в костной ткани, откуда оказывает негативное влияние на гемопоз. Поэтому полученные данные согласуются с мировыми, однако поднимают вопрос о возможной недооценке рисков, связанных с употреблением в пищу костных фрагментов рыбы или связанных со вторичной контаминацией продукта металлами из костных структур, происходящей в процессе приготовления пищи. Если проводить расчёты по объединённым для Cd и Pb данным, когда хотя бы по одному элементу в выборке имелось превышение, то для мышечной ткани доля проб, несоответствующих

СанПин 2.3.2.1078-01 составила 4/45 или 8,9% (95% ДИ от 3,1 по 19,8%), а для костной – 26/45 или 57,8% (95% ДИ от 43,2 по 71,4%). Считаем эти значения достаточно большими, особенно для костной ткани.

Известно, что повышенное содержание в природных средах и сельскохозяйственной продукции Урала экотоксикантов, в особенности – тяжёлых металлов, требует повышенного внимания, вплоть до специальных мероприятий по снижению их негативного влияния. Полученные нами данные показывают, что уральские водоёмы, к сожалению, не являются исключением и также требуют таких мероприятий. Последние могут быть осуществлены как в условиях аквакультуры, так и с использованием методов кулинарной обработки рыбы.

#### **2.2.4.1 Использование кормовых микродобавок в аквакультуре на примере карпов тепловодного садкового хозяйства**

В ходе рандомизационного варианта двухфакторного дисперсионного анализа (РДА) не удалось выявить значимого взаимодействия факторов «Добавки × Время» для длины ( $p=0,616$ ), высоты ( $p=0,549$ ) и массы ( $p=0,935$ ) тела рыб, которое указало бы на различную динамику размерно-весовых показателей в группах. Однако совместный анализ этих данных в рамках дискриминантного анализа однозначно указал на существование сильных межгрупповых различий по комплексу изученных признаков:  $F_{(21/1120)} = 11,992$ ;  $p < 0,0001$ . Они заключались в том, что в контрольной группе прирост размерно-весовых показателей за 30 дней был минимален, проявлялся в группах получавших с комбикормом добавки естественного (белая глина) и искусственного (полисорб) сорбентов.

Аналогичные анализы выполнены для концентраций в тканях карпа 10 ТМ. С помощью РДА установлен факт различия групп по содержанию Ni, Zn и Cu. Для других металлов наблюдались близкие к значимым различия в костной ткани, причём максимальные концентрации наблюдались в разных экспериментальных группах. Поэтому для облегчения интерпретации полученного массива данных, как и в предыдущем случае, был проведён дискриминантный анализ. В ходе него между 5-ю экспериментальными группами карпа были обнаружены статистически значимые различия по содержанию и соотношению тяжелых металлов как в мышечной, так и в костной ткани: соответственно  $F_{(40/43)} = 1,73$ ;  $p=0,039$  и  $F_{(40/43)} = 2,13$ ,  $p=0,008$ ).

В мышечной ткани наиболее сильные различия обнаружены по Ni и Mn, которые в более высоких концентрациях накопили карпы контрольной группы к концу эксперимента (см. рисунок 11). Вдоль второй оси в рыбе наблюдалось увеличение паттерна металлов Южноуральского водохранилища (Ni-Co-Cr) и Sr. В группах получавших сорбенты их накопление было менее выражено, чем в группе серы. Более сильные изменения отмечены в костной ткани: вдоль первой оси наблюдался рост микроэлементов (Mn, Fe, Zn) при параллельном снижении паттерна элементов-ксенобиотиков. Видно, что максимальный положительный эффект отмечен в группах, получавших сорбенты, тогда как карпы, получавшие микродобавку серы оказались на графике в зоне наибольшей концентрации токсикантов.

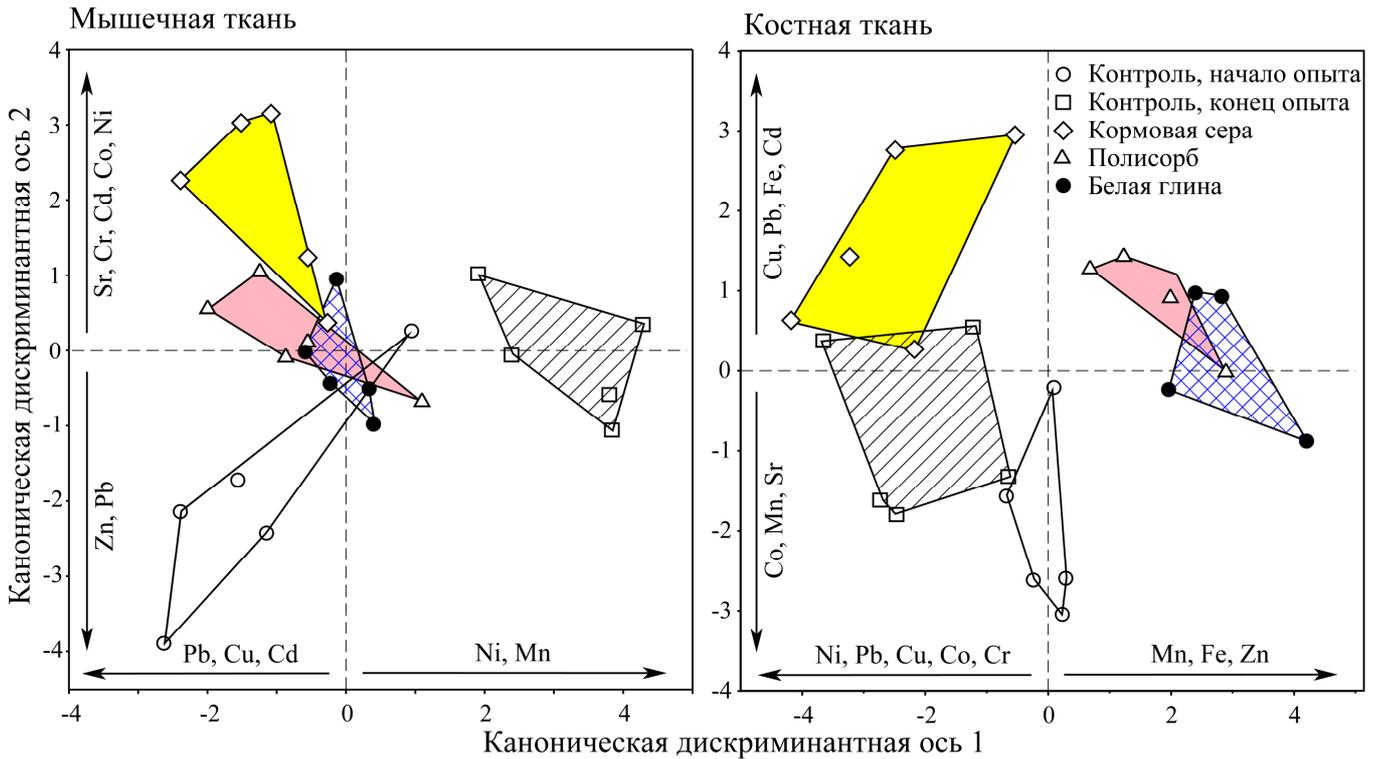


Рисунок 11 – Карпы экспериментальных групп в пространстве двух дискриминантных осей содержания микроэлементов и тяжёлых металлов в тканях

Анализ питательной ценности карпов не выявил различий между экспериментальными группами по содержанию общего белка ( $p=0,794$ ), влаги ( $p=0,330$ ) и минеральных веществ ( $p=0,951$ ). Наиболее заметные различия наблюдались по содержанию жира (минимум – в группе, получавшей серу, максимум – в группе, получавшей белую глину); но они также не были статистически значимыми ( $p=0,130$ ).

#### 2.2.4.2 Влияние кулинарной обработки на содержание тяжёлых металлов в рыбе

Нормы технического регулирования разработаны преимущественно для свежих продуктов и не учитывают влияния кулинарных обработок на содержание в продукции токсикантов, которое по литературным данным может как увеличиваться, так и снижаться. В рамках исследования этой проблемы был проведён эксперимент с солёнием и варкой рыбы, результаты которого кратко представлены на рисунке 12.

Концентрация Pb во всех группах оказалась в 8–27 раз меньше норматива. Содержание Cd превышало норматив для свежей плотвы в 1,8 раза, а также для всех групп солёной рыбы в 1,4–1,9 раза. Важен факт статистически значимого увеличения Cd в мышечной ткани окуня с безопасного уровня в свежей рыбе до превышающих норматив концентраций в результате солёния. Также важно отметить факты значительного снижения концентраций Pb и Cd в мышечной ткани рыбы в результате варки, которые в 4 случаях из 8 были статистически значимыми.

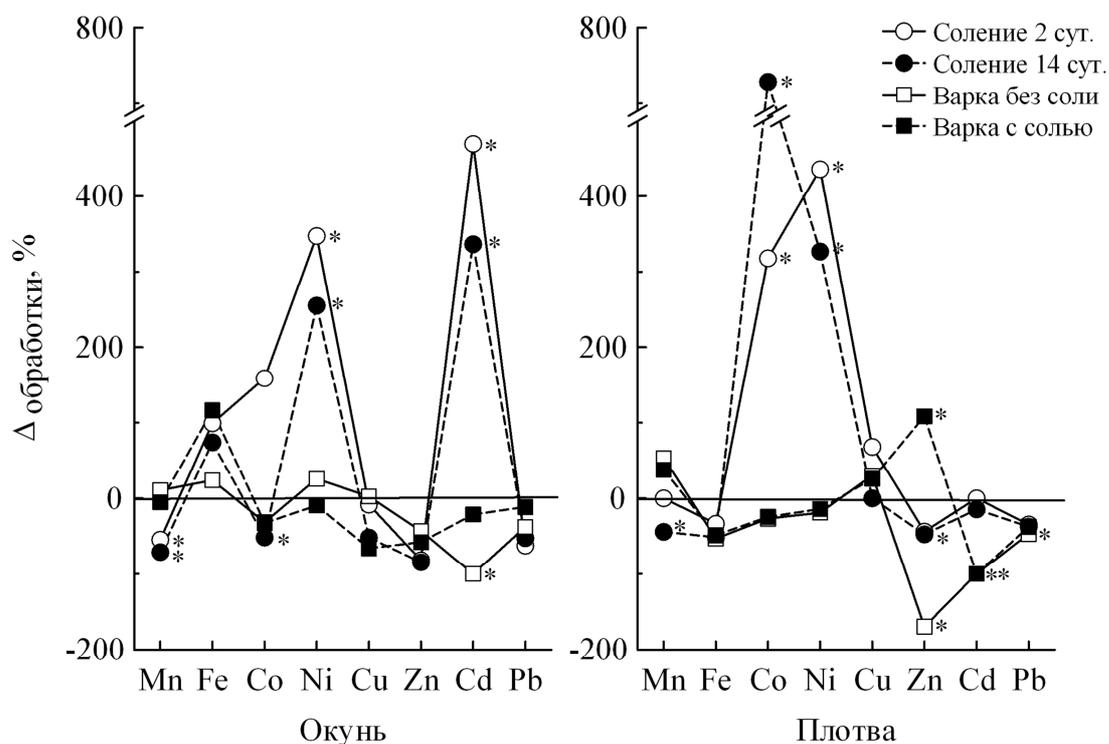


Рисунок 12 – Профили изменения концентрации металлов в мышечной ткани по отношению к свежей рыбе (в %) в результате обработок. \* –  $p \leq 0,05$ .

Анализ этих результатов в разделе 2.2.5 показывает, что, помимо специфики, привносимой кулинарной обработкой и особенностями поведения разных химических элементов, существенное влияние на содержание токсических веществ в приготовленной рыбе может оказывать экологическая и геохимическая обстановка на рыбохозяйственных водоёмах. Поэтому для уменьшения риска вторичной контаминации мышечной ткани из аккумулирующих поллютанты внутренних органов и тканей рыб, при приготовлении мелкую рыбу следует потрошить так же как и крупную.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

#### Выводы

1. На основании анализа химического состава и качества воды 54 озёр, 29 рек и 13 водохранилищ и прудов Урала дана классификация воды по химическому составу, определены частоты превышения ПДК для рыбохозяйственных водоёмов. С применением диаграмм Пайпера и кластерных тепловых карт показано, что:

– наиболее неоднородная и проблемная ситуация наблюдается на уральских озёрах, где отмечаются превышения ПДК<sub>ВР</sub> по рН, главным ионам, содержанию кислорода, катиону аммония, нитратам, фосфатам, фтору, барии и стронцию;

– для рек характерен более однородный химический состав воды и более высокое её качество, за исключением: нитритов, терригенных элементов, связанных с выветриванием уральских горных пород – Li, Ni, Co, а также элементов автотранспортного паттерна поллютантов – Zn, Cd, Pb;

– наиболее благополучная для рыболовной деятельности ситуация отмечается на водохранилищах и в прудах. Характерным для искусственных водоёмов загрязнителем является органическое вещество (БПК<sub>5</sub>) и связанные с ним микроэлементы – Zn, Mn, Fe, Cu.

2. В ходе биотестирования 5 водохранилищ Челябинской области по реакции хемотаксиса парамеций установлено, что токсичные свойства воды наблюдались в водохранилищах-охладителях ГРЭС – Троицком (индекс токсичности  $I_{\text{токс.}} = 0,63$ ) и Южноуральском (0,39), – что статистически значимо превышало значения для Аргазинского (-0,02), Шершнёвского (0,09) и Магнитогорского (0,14) водохранилищ.

3. По результатам анализа донных отложений в 9 озёрах, 14 реках и 10 искусственных водоёмах установлено, что:

– содержание элементов в донных отложениях подчинялось закономерности: Fe > Mn > Zn > Ni > Pb > Cu > Co > Cd, что за исключением Pb, соответствует положению их кларков для верхней части континентальной коры;

– существует тенденция к большему накоплению металлов в донных отложениях озёр, промежуточному – в реках, минимальному – в водохранилищах и прудах ( $p=0,072$ );

– распределение концентраций металлов в водоёмах было полимодальным, что позволило разделить смесь распределений с получением границ для экологического нормирования;

– применение многомерных статистических техник и пространственной интерполяции позволяет выявлять парагенетические ассоциации элементов преимущественно техногенного или естественного происхождения. В уральских водоёмах наиболее распространена ассоциация Ni–Co–Cu(–Cr), маркирующая естественную терригенную составляющую донных отложений. Техногенными являются автотранспортная ассоциация Pb–Cd–Zn и специфические паттерны загрязнения конкретных предприятий: Fe–Pb–Cu(–Zn) – Карабашского медеплавильного комбината, Pb–Fe–Ni – Южноуральской ГРЭС, Mn–Fe–Pb – Троицкой ГРЭС и др.

4. В 45 выборках рыбы из 16 уральских водоёмов определено содержание 8 тяжёлых металлов в мышечной и костной тканях. Максимальные концентрации Cd в мышечной ткани отмечены у плотвы водохранилища-охладителя Южноуральской ГРЭС (0,35 мг/кг сырого веса), Pb – у леща Аргазинского водохранилища, находящегося в зоне влияния Карабашского медеплавильного комбината (3,35 мг/кг сырого веса). Установлена положительная корреляция между концентрацией Pb в воде и в мышечной ткани рыб ( $r_s=0,61$  для плотвы и  $r_s=0,62$  для окуня) и отрицательная для Fe (-0,72 и -0,62) и Cu (-0,66 и -0,63) в воде и костной ткани. В мышечной ткани рыб превышения нормативов для рыбы и рыбопродуктов наблюдались: по Cd – в 4,4% случаев, по Pb – в 4,4% случаев, по Cd и Pb суммарно – в 8,9% случаев (95% ДИ от 3,1 по 19,8%). Для костной ткани частоты превышений составили: по Cd – 35,6%, по Pb – также 35,6%, по Cd и Pb суммарно – 57,8% (95% ДИ от 43,2 по 71,4%).

5. На основе данных о содержании тяжёлых металлов в органах и тканях рыб предложены две техники оценки экологического состояния водоёмов и его

особенностей. Необъяснённая дисперсия комплекса показателей, выделяемая рядом многомерных статистических техник (RDA, САТРСА), указывает на показатели, не подчиняющиеся общим закономерностям варьирования, которые часто являются поллютантами водоёмов и/или элементами-ксенобиотиками для рыб. В рамках методологии корреляционной адаптометрии разработана техника сравнения популяций по весу корреляционного графа и средней абсолютной корреляции (САК) с использованием ресэмплинг-техники складного ножа. Показано, что максимальные адаптационные траты популяции на поддержание микроэлементного гомеостаза отмечаются в популяциях плотвы и окуня контрольных водоёмов, высокие – в водохранилищах вблизи металлургических предприятий, максимальные – в озере с высокой естественной минерализацией воды.

6. В 6 водохранилищах и 3 озёрах определены паразитарные заболевания рыбы и оценен уровень токсических и генотоксических эффектов в эритроцитах периферической крови. Установлено, что основными паразитарными заболеваниями плотвы и окуня являются диплостомоз и тетракотилёз. Уровень эритроцитов с микроядрами в популяциях плотвы варьировал от 4,6 до 23,6%, леща – от 2,0 до 13,2% и не всегда соответствовал уровням техногенной нагрузки на водоём. Минимальная цитогенетическая нестабильность отмечена в популяциях рыб Верхнеуральского водохранилища, максимальная – в озёрах Чебаркульской группы (Б. Кисегач, Б. Сунукуль). С применением многомерных методов показано, что общие причины могут лежать в основе феноменов инвагинация ядра и амитоза, а также смещения ядра и его пикноза.

7. В ходе 30-дневного научно-производственного опыта на карпах тепловодного садкового хозяйства изучено влияние кормовых микродобавок серы кормовой, искусственного сорбента «Полисорб ВП» и естественного сорбента белой глины на размерно-весовые показатели рыб, содержание тяжёлых металлов и питательную ценность. Установлено, что в результате применения сорбентов статистически значимо увеличивались длина и масса тела, в мышечной ткани не накапливался техногенный Ni, а в костной ткани увеличивалась концентрация микроэлементов – Mn, Fe, Zn. Добавка серы не оказывала положительного эффекта. Применение микродобавок не сказалось на питательной ценности карпа.

8. В эксперименте с солением и варкой рыбы из водохранилища-охладителя ГРЭС изучено влияние кулинарных обработок на содержание металлов в тканях. Соление рыбы увеличивало содержание в мышечной ткани Ni, Cd у окуня и Ni, Co у плотвы. Варка рыбы снижала содержание Cd на 21,2 – 100% у окуня и на 100% у плотвы, снижала содержание Pb у плотвы на 37,5 – 46,9% и Co у плотвы на 24 – 26,7%. Максимальный и статистически значимый эффект снижения токсикантов в мышечной ткани отмечался в вариантах варки без соли ( $p = 0,031 - 0,019$ ).

### 3.2 Практические предложения

1. Для оценки экологического состояния водоёмов, выявления загрязнителей преимущественно антропогенной или естественной природы и их паттернов рекомендуется использовать многомерные техники анализа данных:

– многомерный анализ содержания тяжёлых металлов в донных отложениях позволяет обнаруживать и интерпретировать парагенетические ассоциации элементов;

– многомерный анализ показателей химического состава воды или тканей рыбы с набором инструментальных показателей-регрессоров позволяет по высокой доле необъяснённой дисперсии обнаруживать не зависящие от регрессоров показатели, варьирующие в результате других причин, часто – антропогенных (техногенных).

Полученная информация может быть использована для выявления приоритетных загрязнителей водоёмов и принятия управленческих решений без привлечения контрольных объектов и в отсутствие разработанных нормативов (ПДК и аналоги).

2. Внесение природных и искусственных сорбентов в корма для выращиваемых в аквакультуре рыб рекомендуется не только для увеличения размерно-весовых показателей, но и для коррекции содержания в тканях микроэлементов и тяжёлых металлов.

3. Для снижения концентрации в мышечной ткани рыб токсичных тяжёлых металлов, включая кадмий и свинец, рекомендуется использовать варку рыбы без соли.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ*

1. Арсентьева, Н. Ю. Качество воды и микробиологическая характеристика водохранилища Троицкой ГРЭС / Н. Ю. Арсентьева, Д. Ю. Нохрин // Вода: химия и экология. – 2010. – № 7. – С. 22-28.
2. **Нохрин, Д. Ю.** Экспресс-оценка токсичности воды крупных водохранилищ Челябинской области с использованием простейших / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2011. – № 2. – С. 105-108.
3. **Нохрин, Д. Ю.** Химический состав воды ряда водохранилищ Южного Урала / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Вода: химия и экология. – 2011. – № 2. – С. 2-8.
4. Арсентьева, Н. Ю. Микробиологическая характеристика экологического состояния реки Миасс, Аргазинского и Шершнёвского водохранилищ / Н. Ю. Арсентьева, Д. Ю. **Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Вода: химия и экология. – 2011. – № 6. – С. 2-8.
5. Давыдова, Н. А. Металлы в рыбе реки Миасс / Н. А. Давыдова, Д. Ю. **Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2012. – Т. 8, № 2. – С. 71-75.
6. Давыдова, Н. А. Влияние Карабашского медеплавильного комбината на содержание металлов в рыбе Аргазинского водохранилища / Н. А. Давыдова, Д. Ю. **Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Вода: химия и экология. – 2012. – № 10. – С. 114-118.
7. **Нохрин, Д. Ю.** Качество воды в ряде животноводческих хозяйств Челябинской области / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». 2014. № 2. С. 60-64.

8. Давыдова, Н. А. Содержание металлов в рыбе озера Чебакуль (Челябинская область) / Н. А. Давыдова, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2015. – № 1. – С. 95-98.
9. Давыдова, Н. А. Экогеохимическое исследование озер Маян и Куракли-Маян (Челябинская область) / Н. А. Давыдова, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский, А. Н. Торчицкий // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2018. – № 4. – С. 225-230. DOI: 10.17238/issn2072-6023.2018.4.225.
10. **Нохрин, Д. Ю.** Корреляционная адаптометрия микроэлементного состава тканей как метод оценки среднего стресса (на примере популяции промысловых рыб минерализованного водоема) / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2018. – № 4. – С. 252-255. DOI: 10.17238/issn2072-6023.2018.4.252.
11. **Нохрин, Д. Ю.** Влияние соления рыбы на содержание в ней тяжёлых металлов / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2019. – № 2. – С. 120-122. DOI: 10.17238/issn2072-6023.2019.2.
12. Колесник, Е. А. Оценка лейкоцитарного профиля промысловой рыбы из озер Челябинской области / Е. А. Колесник, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский, А. Н. Торчицкий // Аграрный вестник Урала. – 2019. – Т. 187, № 8. – С. 39-44. DOI: 10.32417/article\_5d908b85dcb853.25473638.
13. **Нохрин, Д. Ю.** Экспериментальная оценка эффективности варки рыбы для снижения концентрации в ней тяжёлых металлов / Д. Ю. Нохрин, Н. А. Давыдова // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2020. – № 3. – С. 164-166. DOI: 10.17238/issn2072-6023.2020.3.164.

***В изданиях, индексируемых системами цитирования Scopus и Web of Science***

14. **Nokhrin, D. Yu.** Approaches to the identification of the origin of heavy metals in bottom sediments and standardization problems: case study of two SDPP reservoirs in Ural region / D. Yu. Nokhrin, Yu. G. Gribovskii, N. A. Davydova // Water Resources. – 2008. – V. 35, № 5. – P. 542-549. DOI: 10.1134/S0097807808050059.
15. Sokol, E.V. Environmental-geochemical state of the Yuzhnoural'skaya SDPP reservoir / E. V. Sokol, **D. Yu. Nokhrin**, E. N. Nigmatulina, Yu. G. Gribovskii // Water resources. – 2008. – V. 35, № 6. – P. 686-700. DOI: 10.1134/S0097807808060080.
16. **Nokhrin, D. Yu.** Using unexplained variation in the chemical composition of organisms for identification of xenobiotics in ecological studies / D. Yu. Nokhrin, Yu. G. Gribovskii, N. A. Davydova // Russian Journal of Ecology. – 2011. – V. 42, № 5. – P. 407-413. DOI: 10.1134/S1067413611040138.
17. **Nokhrin, D. Yu.** The microelemental composition of Magnitogorsk reservoir bottom sediments: methodological aspects and paragenetic associations / D. Yu. Nokhrin, Yu. G. Gribovskii, E. V. Sokol, N. A. Davydova, E. N. Nigmatulina // Contemporary Problems of Ecology. – 2010. – V. 3, № 4. – P. 487-494. DOI: 10.1134/S1995425510040132.
18. Flefel, H. E. Chemical composition and water quality of some rivers of the Sverdlovsk oblast (Ural, Russia) / H. E. Flefel, **D. Yu. Nokhrin**, I. M. Donnik // Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries. – 2019. – V. 23, № 4. – P. 659-666. DOI: 10.21608/EJABF.2019.60919.
19. Flefel, H. E. Determine heavy metals in water, aquatic plants, and sediment in water systems / H. E. Flefel, **D. Yu. Nokhrin**, I. M. Donnik // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 222. – № 02028. – P. 1-11. DOI: 10.1051/e3sconf/202022202028.

*Научные работы, опубликованные в других научных журналах и изданиях*

20. **Нохрин, Д. Ю.** Использование метода капиллярного электрофореза для определения химического состава вод ряда Уральских водоемов / Д. Ю. Нохрин // Тр. Всеросс. НИИ ветеринарной энтомологии и арахнологии. – 2003. – № 45. – С. 105.
21. **Нохрин, Д. Ю.** Исследование влияния минеральных добавок на ростовые процессы и содержание тяжелых металлов в тканях карпа тепловодного хозяйства / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, М. Г. Жукова // Тр. Всеросс. НИИ ветеринарной энтомологии и арахнологии. – 2003. – № 45. – С. 107-108.
22. Грибовский, Ю. Г. Комплексное исследование экологического и санитарного состояния Южноуральского водохранилища, как водоема-охладителя ТЭЦ / Ю. Г. Грибовский, **Д. Ю. Нохрин** // Тр. Всеросс. НИИ ветеринарной энтомологии и арахнологии. – 2003. – № 45. – С. 43-44.
23. Арсентьева, Н. Ю. Санитарно-бактериологическая и гидрохимическая оценка состояния озера Второго в рыбохозяйственных целях / Н. Ю. Арсентьева, **Д. Ю. Нохрин** // Вестник Челябинского гос. ун-та, Сер. Биология. – 2008. – Вып. 1, № 4. – С. 50-52.
24. Давыдова, Н. А. Особенности микроэлементного состава рыбы Магнитогорского водохранилища / Н. А. Давыдова, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2009. – № 2. – С. 67-72.
25. Арсентьева, Н. Ю. Микробиологическая характеристика экологического состояния реки Миасс и ее водохранилищ / Н. Ю. Арсентьева, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Вестник Челябинского гос. ун-та, Сер. Экология. Природопользование. – 2010. – Вып. 4, № 8. – С. 52-58.
26. **Нохрин, Д. Ю.** Химический состав и качество воды Шершнёвского водохранилища в 2001-2009 гг. / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова, Н. Ю. Арсентьева // Вестник Челябинского гос. ун-та, Сер. Экология. Природопользование. – 2010. – Вып. 4, № 8. – С. 67-71.
27. Корляков, К. А. Тенденции возникновения инвазионного коридора Волга-Обь / К. А. Корляков, **Д. Ю. Нохрин** // Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – 2014. – № 2. – С. 19-38.
28. **Нохрин, Д. Ю.** Химический состав и качество воды реки Сак-Элга (Челябинская область) в 2016 г. / Д. Ю. Нохрин, Н. А. Давыдова // Экология, природопользование и ресурсы Урала. – 2019. – № 1. – С. 19–27.
29. Колесник, Е. А. Характеристика ветеринарно-санитарного благополучия по гельминтозам рыб в водоемах хозяйственного значения Челябинской области / Е. А. Колесник, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2020. – Т. 33, № 1. – С. 80-84. DOI: 10.36871/vet.san.hyг.ecol.202001012.
30. **Нохрин, Д. Ю.** Сравнительная оценка пресноводных водоёмов Челябинской области по содержанию тяжёлых металлов в рыбе / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Аграрный вестник Урала. – 2018. – Т. 177, № 10. – С. 35–40.
31. **Нохрин, Д. Ю.** Химический состав и качество воды 50 уральских озёр в начале XXI века / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Экология, природопользование и ресурсы Урала. – 2021. – № 2. – С. 4-18.

*Статьи в материалах всероссийских и международных научных и научно-практических конференций:*

32. Ходоровская, Н. И. Экологическое состояние Долгобродского водохранилища в 2008 г. / Н. И. Ходоровская, Е. А. Пряхин, В. А. Ячменев, К. С. Чернов, Л. В. Дерябина, С. В. Крайнева, Ю. Г. Грибовский, **Д. Ю. Нохрин**, Е. В. Семенова, А. А. Себирзянова // Экология в высшей школе: синтез науки и образования : Матер. Всерос. научно-практ. конф., 30 марта – 1 апреля 2009 г. : в 2 ч. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2009. – Ч. 1. – С. 297-299.
33. **Нохрин, Д. Ю.** Природные и техногенные составляющие качества воды водохранилищ Челябинской области / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова, Г. И. Хасанова, А. Н. Торчицкий // Экология, охрана водных ресурсов и водоочистка : Сб. статей Междунар. научно-практич. конф. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – С. 25-30.
34. **Нохрин, Д. Ю.** Сравнение результатов определения металлов в рыбе методами ААС и РФА-СИ / Д. Ю. Нохрин // Сб. матер. междунар. научно-практич. конф. «Современные направления инновационного развития ветеринарной медицины, зоотехнии и биологии». – Уфа : РИО ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 2015. – С. 138-140.
35. **Нохрин, Д. Ю.** Гидрохимическая характеристика реки Атлян и озера Хамят (Челябинская область) / Д. Ю. Нохрин // Актуальные вопросы современного естествознания Южного Урала : матер. II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 7 дек. 2016 г., Челябинск. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. – С. 196-205.
36. **Нохрин, Д. Ю.** Гидрохимическая характеристика памятника природы озера Чебакуль (Челябинская область) / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Актуальные вопросы современного естествознания Южного Урала: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 7 дек. 2016 г., Челябинск. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. С. 205-214.
37. Корляков, К. А. Некоторые данные о высокоминерализованных озёрах, расположенных к востоку от города Челябинска, как ресурсном фонде гипергалинной фауны и флоры / К. А. Корляков, **Д. Ю. Нохрин** // Актуальные вопросы современного естествознания Южного Урала : матер. II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 7 дек. 2016 г., Челябинск. – Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. – С. 177-181.
38. **Нохрин, Д. Ю.** Экогеохимическая характеристика пруда на Безымянной балке (Челябинская область) / Д. Ю. Нохрин, К. А. Корляков, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Матер. междунар. научно-практич. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФСР, доктора ветеринарных наук, профессора Кабыша Андрея Александровича. – Троицк : Южно-Уральский ГАУ, 2017. – С. 299-305.
39. **Нохрин, Д. Ю.** Сведения о перспективной ООПТ – озере Тулак (Челябинская область) / Д. Ю. Нохрин, М. Ю. Балашов, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова // Актуальные вопросы современного естествознания Южного Урала : матер. III Всерос. науч.-практ. конф., 21 дек. 2018 г., Челябинск / под ред. В. В. Меркер, Д. Ю. Нохрина. – Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2018. – С. 78-85.
40. **Нохрин, Д. Ю.** Нестандартное использование многопеременных статистических техник в экологических исследованиях / Д. Ю. Нохрин // Экология и эволюция: новые горизонты: матер. Междунар. симп., посвящ. 100-летию академика С. С. Шварца (1-5 апреля 2019 г., г. Екатеринбург). – Екатеринбург: Гуманитарный университет, 2019. – С. 77-80.
41. **Нохрин, Д. Ю.** Корреляционная адаптометрия микроэлементного состава тканей рыб уральских водоёмов в присутствии природных и техногенных стрессоров / Д. Ю.

Нохрин // Образование магистров: проблемы и перспективы развития : тез. докл. III Всеросс. научно-практич. конф. (21-27 ноября 2019 г., г. Челябинск). – Челябинск : Изд-во ЧелГУ, 2019. – С. 77-80.

**Статьи в материалах региональных научных и научно-практических конференций**

42. Грибовский, Г. П. Гидрохимическая характеристика Верхнеуральского водохранилища / Г. П. Грибовский, Ю. Г. Грибовский, Д. Ю. Нохрин // Актуальные проблемы ветеринарной медицины: Матер. науч.-практ. и науч.-метод. конф. – Троицк: УГАВМ, 2001. – С. 27-29.
43. Грибовский, Г. П. Содержание тяжелых металлов в воде, донных отложениях и рыбе Верхнеуральского водохранилища / Г. П. Грибовский, Ю. Г. Грибовский, Д. Ю. Нохрин // Актуальные проблемы ветеринарной медицины: материалы науч.-практич. и науч.-метод. конф. – Троицк: УГАВМ, 2001. – С. 30-32.
44. **Нохрин, Д. Ю.** Микроядерный анализ эритроцитов крови рыб Верхнеуральского водохранилища / Д. Ю. Нохрин, В. Н. Филатов // Актуальные проблемы ветеринарной медицины: Матер. науч.-практ. и науч.-метод. конф. – Троицк: УГАВМ, 2001. – С. 27-29.
45. **Нохрин, Д. Ю.** Исследование химического состава и качества воды Шершневого водохранилища в связи с замором рыбы в августе 2003 г. / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, П. В. Дергалев // Водные ресурсы Южного Урала – 2004. Проблемы водохозяйственного комплекса: Сб. науч. статей научно-практ. конф., Челябинск, 27-28 апреля 2004 г. – Челябинск, 2004. – С. 184-186.
46. **Нохрин, Д. Ю.** Эколого-генетический мониторинг водоёмов Челябинской области: первые результаты / Д. Ю. Нохрин // Водные ресурсы Южного Урала - 2004. Проблемы водохозяйственного комплекса: Сб. науч. статей науч.-практ. конф., Челябинск, 27-28 апреля 2004 г. – Челябинск, 2004. – С. 186-188.
47. Грибовский, Ю. Г. Комплексная оценка экологического состояния водохранилищ ГРЭС Челябинской области / Ю. Г. Грибовский, Д. Ю. Нохрин, Н. А. Давыдова, Г. И. Хасанова // Водные ресурсы Южного Урала – 2004. Проблемы водохозяйственного комплекса : Сб. науч. статей научно-практ. конф., Челябинск, 27-28 апреля 2004 г. – Челябинск, 2004. – С. 192-195.
48. **Нохрин, Д. Ю.** Исследование химического состава сточных вод г. Челябинска / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова, Г. И. Хасанова // Водные ресурсы Южного Урала - 2004. Проблемы водохозяйственного комплекса : Сб. науч. статей научно-практ. конф., Челябинск, 27-28 апреля 2004 г. – Челябинск, 2004. – С. 215-217.
49. **Нохрин, Д. Ю.** Идентификация происхождения металлов в водоёмах Челябинской области и проблемы нормирования / Д. Ю. Нохрин // Экологическая политика в обеспечении устойчивого развития Челябинской области : Матер. межрег. науч.-практ. конф., Челябинск, 7-8 декабря 2004 г. / Отв. ред. Н.А. Плохих. – Челябинск: Челяб. гос. ун-т, 2005. – С. 141-142.
50. **Нохрин, Д. Ю.** Особенности химического состава воды и донных отложений р. Миасс в черте г. Челябинска / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова, А. Н. Торчицкий, Г. И. Хасанова // Охрана водных объектов Челябинской области. Проблемы и пути их решения в условиях современного законодательства : Сб. докл. и сообщ. обл. научно-практ. конф. – Челябинск: Издатель Татьяна Лурье, 2007. – С. 113-117.
51. Давыдова, Н. А. Экологическая оценка состояния Магнитогорского водохранилища в 2006 году / Н. А. Давыдова, Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Торчицкий, Г. И. Хасанова // Охрана водных объектов Челябинской области. Проблемы и пути их

- решения в условиях современного законодательства. – Сб. докл. и сообщ. обл. научно-практ. конф. – Челябинск: Издатель Татьяна Лурье, 2007. – С. 72-77.
52. **Нохрин, Д. Ю.** Ядерные и цитоплазматические нарушения в эритроцитах крови рыб трёх водохранилищ Челябинской области / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский // Фармакологические и экотоксикологические аспекты ветеринарной медицины : Матер. научно-практ. конф. фармакологов РФ. – Сб. науч. тр. – Троицк: УГАВМ, 2007. – С. 208-213.
53. Грибовский, Ю. Г. Результаты комплексного обследования экологического состояния Магнитогорского водохранилища / Ю. Г. Грибовский, **Д. Ю. Нохрин**, Н. А. Давыдова, А. Н. Торчицкий // Фармакологические и экотоксикологические аспекты ветеринарной медицины: Матер. научно-практ. конф. фармакологов РФ. – Сб. науч. тр. – Троицк: УГАВМ, 2007. – С. 64-70.
54. Давыдова, Н. А. Экспресс-оценка токсичности воды трёх водохранилищ Челябинской области / Н. А. Давыдова, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский, А. Н. Торчицкий // Фармакологические и экотоксикологические аспекты ветеринарной медицины: Матер. научно-практ. конф. фармакологов РФ : Сб. науч. тр. – Троицк: УГАВМ, 2007. – С. 73-78.
55. **Нохрин, Д. Ю.** Содержание и парагенетические ассоциации металлов в донных отложениях водохранилищ Челябинской области / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова, Г. И. Хасанова // Охрана водных объектов Челябинской области. Современные технологии водопользования: Сб. докл. и сообщ. обл. научно-практ. конф. – Челябинск: Министерство по радиац. и экол. Безопасности Челябинской обл., 2008. – С. 147-152.
56. Давыдова, Н. А. Оценка экологического и ветеринарно-санитарного состояния Аргазинского водохранилища в 2007 г. / Н. А. Давыдова, **Д. Ю. Нохрин**, Ю. Г. Грибовский, А. Н. Торчицкий, Г. И. Хасанова // Охрана водных объектов Челябинской области. Современные технологии водопользования : Сб. докладов и сообщений обл. научно-практ. конф. – Челябинск: Министерство по радиац. и экол. Безопасности Челябинской обл., 2008. – С. 108-112.
57. **Нохрин, Д. Ю.** Состав и качество воды крупных водохранилищ Челябинской области / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова, А. Н. Торчицкий, Г. И. Хасанова // Охрана водных объектов Челябинской области. Современные технологии водопользования : Сб. тезисов обл. научно-практ. конф. [Электронный ресурс] – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : зв., цв.; 12 см. Челябинск: Минист-во по радиац. и экол. безоп. Челяб. обл., 2010. С. 102-104.
58. Давыдова, Н. А. Содержание тяжелых металлов в тканях рыб водохранилищ реки Миасс / Н. А. Давыдова, Ю. Г. Грибовский, **Д. Ю. Нохрин**, А. Н. Торчицкий, Г. И. Хасанова // Охрана водных объектов Челябинской области. Современные технологии водопользования : Сб. тезисов обл. научно-практ. конф. [Электронный ресурс] – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : зв., цв.; 12 см. Челябинск: Минист-во по радиац. и экол. безоп. Челяб. обл., 2010. С. 160-163.

### *Монография*

59. Экологическое и ветеринарно-санитарное состояние водохранилищ Челябинской области : монография; ред. **Д. Ю. Нохрин**. – Екатеринбург: Новый формат, 2020. – 226 с. (ISBN 978-5-91556-894-4).

Нохрин Денис Юрьевич

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНОГО  
СОСТОЯНИЯ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВОДОЁМОВ НА УРАЛЕ

4.2.2. Санитария, гигиена, экология, ветеринарно-санитарная экспертиза  
и биобезопасность

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертация на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Подписано в печать 11.07.2025. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 2,0 Бумага для множительных аппаратов. Печать офсетная.  
Гарнитура Times New Roman. Объем 2 п.л. Заказ № 540. Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии Издательства Челябинского государственного  
университета  
454021, г. Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 57б