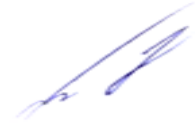


На правах рукописи



ТРИГУБ АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ СОЛЕЙ НАТРИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ГИДРОБИОНТОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ВОДАХ**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Оренбург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)».

Научный руководитель кандидат биологических наук, доцент
Медянкина Мария Владимировна

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

Зинчук Ольга Анатольевна
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Южный филиал Государственного научного центра Российской Федерации федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», лаборатория рыбохозяйственной токсикологии, заведующий.


Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

Защита состоится «17» июня 2026 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.352.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет им В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13, аудитория 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет им В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13 и на сайте <http://www.osu.ru/doc/5595/asp/262>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аринжанов Азамат Ерсайнович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Проблема загрязнения водных сред остается крайне актуальной и приобретает все большую значимость. В рамках этой проблематики разрабатываются рыбохозяйственные нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) в водоемах, а также проводится оценка токсичности отдельных ионов неорганических солей (Шилова и др., 2014, Денисюк и др., 2023, Житкова и др., 2023, Какой вред..., 2023). Проведены экспериментальные работы, направленные на изучение синергетического или антагонистического экотоксикологического воздействия положительно и отрицательно заряженных частиц потенциально опасных солей на компоненты трофических сетей гидробиологических сообществ (Крылова, 2020). В качестве биоиндикаторов применяются гидробионты, позволяющие оценить комбинированное воздействие анионов и катионов на их развитие, репродуктивные функции и общие показатели качества водной среды, при использовании основных онтогенетических характеристик, которые наиболее чувствительны к антропогенному воздействию (Филенко, Чуйко, 2017, Моисеенко, 2021, Сульфаты..., 2023).

Степень разработанности. Экотоксикологические исследования с использованием тест-организмов, представляющих собой представительных гидробионтов водного биоценоза и его трофической структуры, проводятся достаточно давно, большинство из этих работ посвящено вопросам водной токсикологии и рыбохозяйственному нормированию. Однако, совершенствование методических указаний по нормированию вредных веществ в воде рыбохозяйственных водоемов не закончено. Многолетний опыт и множество опубликованных работ по водной токсикологии позволяет определить чувствительные жизненные стадии гидробионтов. Ряд исследователей уже внесли свой вклад в изучение критических этапов онтогенеза у гидробионтов различного систематического уровня и различных жизненных форм в условиях антропогенной нагрузки, с целью сокращения токсикологических экспериментов и работы на малочувствительных к токсикантам стадиях онтогенеза (Балаян и др., 2014, Зуева и др., 2018, Саидов, Косевич, 2019, Astaykina A. et al, 2020). Подобные исследования в водной токсикологии начались еще в 19 веке (Купцис, 1901) и продолжают проводиться все последние десятилетия (Cardenas, et al, 2004, Абраменко, 2017). В водной токсикологии есть еще множество вопросов, которые надо решить в ближайшее время.

Целью диссертационной работы, которая выполнялась в соответствии с НИОКТР (госрегистрация: № 123031700055-5) для решения проблемы установления региональных нормативов ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, являлось исследование и оценка биологических эффектов загрязнения водной среды солями щелочных металлов на представителей гидробиоценоза из разных систематических групп для решения проблемы

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1). Оценить токсичность катиона натрия для представителей фитопланктона

(*Sc. quadricauda*) и зоопланктона (*D. magna*), нектобентоса (*H.azteca*) и рыб (*D.rerio*) в составе солей, включающих разные анионы.

2). Оценить влияние ионов солей, внесенных в водную среду с различным гидрохимическим составом, на показатели выживаемости и плодовитости ракообразных *D. magna* в исходных выборках и в трех последующих поколениях для выявления отдаленного токсического эффекта.

3). Определить наиболее чувствительные биологические показатели рыб в воде с различным гидрохимическим составом и установить критические стадии развития в раннем онтогенезе рыб при действии потенциально токсичных веществ.

4). Выявить наиболее чувствительные биологические показатели влияния на водные организмы растворов солей в водной среде из разных источников и дать сравнительную оценку этого влияния в разных природных водах.

5). Дать рекомендации о необходимости учета токсичности анионов при сравнении действия солей на водные организмы в рамках регионального нормирования.

Научная новизна работы. Впервые проведена сравнительная оценка влияния анионов в составе неорганических солей на биологические показатели исследуемых гидробионтов в природных водах различного гидрохимического состава. Впервые дана сравнительная оценка токсичности катиона натрия для одноклеточной водоросли *Sc. quadricauda* и ракообразных *D. magna* при использовании в экспериментах солей, включающих разные анионы. Оценено влияние ионов солей, внесенных в природную водную среду с различным гидрохимическим составом, на такие показатели у *D. magna*, как размножение, выживание в исходных выборках и в трех последующих поколениях для выявления отдаленного токсического эффекта. Впервые установлено, что наиболее чувствительным показателем, индикатором, биомаркером при действии высоких концентраций неорганических солей на рыб *D. rerio* является выклев предличинок из яичевых оболочек при их нахождении в водах различного состава.

Теоретическая и практическая значимость. На основе проведенных исследований установлено, что разные анионы, образовавшиеся при диссоциации солей, обладают разной токсичностью для водных организмов в присутствии одного и того же катиона. Данное исследование свидетельствует о необходимости учитывать роль анионов при сравнении действия солей на водные организмы в рамках токсикологических исследований.

Полученные результаты в настоящее время использованы при установлении региональных рыбохозяйственных нормативов качества водной среды при проведении биотестирования вод, а также в других токсикологических испытаниях на гидробионтах. Так, результаты исследований влияния гидрофосфата натрия на гидробионтов легли в основу установления ПДК для вод с природными особенностями: региональный норматив ПДК фосфат-иона для бассейна реки Ковдоры, левый приток реки Ёна Мурманской области (вместе с озером Ковдор и притоками) утвержден приказом Министерства сельского хозяйства №687 от 22.08.2023 г. Результаты исследований влияния остальных

солей натрия на гидробионтов рекомендованы к утверждению при обосновании региональных нормативов Протоколами заседания Секции рыбохозяйственных нормативов ПДК НТС ФГБУ «ЦУРЭН» от 23.07.2021 г., от 23.12.2022 г. от 27.10.2023 г. Результаты данного исследования имеют потенциал для создания комплексной системы, предназначенной для оценки, контроля и прогнозирования допустимых концентраций загрязняющих веществ в водных объектах. Ценность работы заключается в расширении инструментария для анализа реакций водных организмов на соли натрия и в обосновании наиболее эффективных методов проведения токсикологических тестов. Эти выводы могут быть использованы для совершенствования мониторинга экологического состояния водных экосистем, прогнозирования как непосредственных, так и отложенных последствий антропогенного воздействия на водоемы, а также в качестве учебного материала для научных и образовательных учреждений по направлениям: «Водная токсикология», «Санитарная гидробиология», «Биотестирование природных и сточных вод», «Методы биотестирования и биоиндикации».

Методология и методы исследования. Для проведения исследования были задействованы как общепринятые, так и специфические токсикологические методики, которые являются неотъемлемой частью таких дисциплин, как водная токсикология, санитарная гидробиология и экология водоемов.

Положения, выносимые на защиту:

1). Экотоксикологическая реакция водных организмов на поступление потенциально токсичных соединений в водную среду является полифакторной, зависящей от гидрохимических параметров природных вод, физико-химических свойств ксенобиотиков и видовой специфики тест-организмов. Данное обстоятельство подлежит обязательному учету при нормировании качества вод на региональном и федеральном уровнях.

2). Различие влияния солей на водные организмы, на примере одноклеточной водоросли *Sc. quadricauda*, ракообразных *D. magna* и рыб *D. rerio*, используемых в практике оценки и контроля качества вод может определяться особенностями биологического действия аниона при одинаковом катионе.

3). При обосновании региональных нормативов качества вод для водных объектов необходимо использовать несколько солей и устанавливать предельно допустимый лимит для компонентов растворимой соли, проявившей наибольшую токсичность из исследованных соединений.

4). В процессе установления лимитов поступления потенциально токсичных загрязняющих веществ в природные водные объекты при осуществлении хозяйственной деятельности, приоритет должен отдаваться разработке региональных нормативов, основанных на учете состава вод, присущего различным геохимическим провинциям.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и репрезентативность полученных данных обеспечивается трехкратным повторением экспериментов. Для обработки результатов применялся широкий спектр статистических методов, включая общепринятые и специализированные подходы. Результаты работы доложены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях: IV Балтийский морской форум, международная

научная конференция «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов», (24-25 мая 2016 г., г. Калининград); Международный симпозиум «Биодиагностика и оценка качества среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии», (25-28 октября 2016 г., г. Москва); IX международная научно-практическая конференция «Биотехнология: взгляд в будущее», (30 марта 2023 г., г. Ставрополь); Всероссийская научно-практическая конференция «Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации» (17 апреля 2023 г., г. Пенза); IV Международный симпозиум «Биодиагностика и экологическая оценка окружающей среды: современные технологии, проблемы и решения» (28-31 августа 2023 г., г. Москва); Третья ежегодная всероссийская молодежная конференция по методам и приборам для анализа биологических объектов (14–15 ноября 2024 года, Санкт-Петербург).

Соответствие темы диссертации паспорту специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют направлениям научной специальности 1.5.15. «Экология»: антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы: биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экотоксикология), разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг, разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу (пункт 10 паспорта специальности).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе - 2 публикации в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертационных исследований.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 192 страницах машинописного текста, включает 33 рисунка и 75 таблиц. Список литературы содержит 203 наименования источника литературы, в том числе 110 источников на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.б.н., доценту М.В. Медянкиной, д.б.н., профессору О.Ф. Филенко за ценные советы при написании работы, к.б.н. А.С. Фоминой за консультационную помощь при обработке гистологического материала и анализе крови рыб.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная часть экспериментальных исследований проводилась на базе Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ФГБНУ «ВНИРО», ООО «ЭкоСервис-А» и в аквацентре факультета биотехнологии и рыбного хозяйства Московского государственного университета им. К.Г. Разумовского. Для исследований использовалась природная вода из следующих водотоков: верховье р. Нотика, бассейн р. Луга, Ленинградская обл.; река Верхняя Ковдора, бассейна р. Ковдора, Мурманская

область; верховье р. Белая, бассейн р. Белая, республика Башкортостан. Использовали следующие соли: NaNO_2 , NaNO_3 , Na_2SO_4 , Na_2HPO_4 , NaBr . Выбор концентраций солей для исследований был обусловлен имеющимися научными данными и результатами предварительных испытаний.

Для оценки влияния веществ на фитопланктон в качестве тест-объекта применяли альгологически чистую культуру одноклеточных водорослей *Sc. quadricauda*. Водоросли культивировали на природной стерилизованной воде, с добавлением солей для приготовления среды Прата. Условия культивирования и проведения экспериментов: освещение искусственное, 3000 лк, продолжительность светового дня 12 часов; температура 20 ± 2 °С. Начальная плотность клеток в эксперименте – 25 тыс.кл. /мл. Длительность опыта составляла 14 суток.

Влияние вещества на водоросли оценивали по изменению оптической плотности, измеренной на фотометре «Эксперт-003» при длине волны 626 нм. При изучении воздействия веществ на зоопланктон использовали пресноводных ракообразных *D. magna* возрастом одни сутки. Эксперименты проводили при искусственном освещении 400-600 лк, продолжительности светового дня 12 часов и температуре 20 ± 2 °С. Продолжительность опытов на дафниях составляла 30 дней. Подсчитывали средние значения выживаемости, плодовитости в пересчете на одну самку за 4 помета, процент отклонений от величины реальной плодовитости по отношению к контролю.

Для оценки влияния веществ на нектобентических ракообразных использовали рачков *H. azteca*. Эксперименты проведены на природной воде при температуре 21°С, при искусственном освещении с продолжительностью светового дня 12 часов. В эксперименте оценивали выживаемость половозрелых особей *H. azteca* в течение 30 суток. При исследовании воздействия веществ на рыб в качестве тест-объекта использовали *D. rerio*. На эмбрионах и личинках рыб вели наблюдение за эмбриональным развитием и выклевом предличинок в контроле и в среде с исследуемыми концентрациями. Икру для экспериментов получали от здоровых производителей из стабильной маточной культуры рыб. Опыт проводили в стабильных термостатируемых условиях. Оценивали состояние икры и ход выклева. Учитывали особенности развития и выживаемость эмбрионов, а также фиксировали морфологические изменения у эмбрионов в процентах по отношению к контролю. Наблюдения за развитием в эмбриональный и ранний постэмбриональный периоды ограничивались возможностью перехода предличинок на активное самостоятельное питание. Оценивали скорость выклева и способность к переходу личинок на активное питание. Всего опыт длится 8 суток. Определение влияния веществ на взрослых рыб продолжительностью до 30 суток. Температура воды в течение всего исследования составляла 24,0-24,5 °С. Периодичность освещенности составляла 12 часов – свет, 12 часов - без света. Средний вес особи размером 2,5-2,6 см перед началом эксперимента в среднем составлял 0,23 г, что полностью соответствует методике проведения исследований.

В хронических опытах исследовали поведение и клиническую картину отравления рыб, выживаемость, нарушения покровов тела, изменения

морфофизиологических параметров, гематологические показатели (количество эритроцитов и лейкоцитов, интенсивность кроветворения, морфологическая картина эритроцитов, лейкоцитарная формула), патологоанатомические и гистологические показатели. Из гематологических показателей просчитывали количество эритроцитов и лейкоцитов, исследовали интенсивность кроветворения, морфологическую картину эритроцитов, лейкоцитарную формулу. Патологоанатомические и гистологические исследования проводили по общепринятой в ихтиопатологии схеме. Для фотографирования микропрепаратов в лабораторных условиях использовали микроскоп Микромед С-1. Фотографии получали при увеличении окуляра 15× и объективов 10× и 40×.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние натрия азотистокислого на гидробионтов в воде из верховьев р. Нотика. При концентрации 0,4 мг N-NO₂/л отмечены достоверные отклонения от контроля с 10-х суток (Td=5,24). В диапазоне 0,02–0,1 мг/л выживаемость рачков была на уровне 90–100%, достоверных отличий не выявлено. При 0,2–0,4 мг/л гибель тест-организмов составила 10–35%. Достоверные отличия по плодовитости установлены при 0,2 и 0,4 мг/л (Td=4,89 и 4,38). Смертность эмбрионов рыб при 0,3 и 0,76 мг/л достоверно превышала контроль (23,3 и 36,7% соответственно). Общая выживаемость рыб на ранних стадиях достоверно отличалась от контроля при концентрациях ≥0,15 мг/л (таблица 1).

Таблица 1 - Влияние азотистокислого натрия на общую выживаемость рыб *D. rerio* на ранних стадиях развития (р-значение)

Концентрация, мг/л		Личинки, перешедшие на стадию активного питания, %		Р-значение	Р значение с поправкой
NO ₂	N-NO ₂	%	Доверительный интервал		
Контроль		100	88,43-100	-	-
0,05	0,015	100	88,43-100	-	-
0,1	0,03	90	73,47-97,89	0,119	0,119
0,5	0,15	83,33	65,28-94,36	0,026	0,052
1	0,3	66,67	47,19-82,71	0	0,001
2,5	0,76	50	31,3-68,7	0	0

Примечание: % - выживших рыб; р-значение точного теста Фишера (с поправкой Бонферрони-Холма), жирным шрифтом выделены достоверные отличия от контрольных значений.

В концентрациях 0,64–1,3 мг/л отмечено достоверное снижение численности рыб (13,4–20,0%). По приросту биомассы достоверные отличия установлены при 0,64 и 1,3 мг/л. При 1,3 мг/л в крови отмечено увеличение нормобластов, зрелых нейтрофилов и моноцитов при снижении лимфоцитов. Печень увеличена при 0,64 и 1,3 мг/л, желчный пузырь – при 1,3 мг/л. Концентрации 0,64 и 1,3 мг/л снижают интенсивность питания. При 0,16 мг/л усиливалась гиперемия, жаберные ламеллы утолщены и укорочены. При 0,32 мг/л ламеллы искривлены и повреждены. При 0,64 и 1,3 мг/л – срастание ламелл. С 0,16 мг/л отмечается патологическое действие на жабры и печень. *Концентрация*

натрия азотистокислого, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 0,03 мг N-NO₂/л (лимитирующий показатель – выживаемость личинок рыб).

Влияние натрия азотнокислого на гидробионтов в воде из верховьев р. Нотика. При 45 и 60 мг N-NO₃/л установлены достоверные отклонения оптической плотности водорослей на 3 и 7 сутки. В этих же концентрациях отмечены достоверные отличия по поколениям F1 и F2. При 200 мг/л смертность эмбрионов достоверно превышала контроль. Общая выживаемость рыб достоверно отличалась от контроля при концентрациях >50 мг/л, где также выявлены аномалии эмбрионов (поздний выклев). По приросту биомассы достоверные отличия установлены при 200 и 250 мг/л. При 250 мг/л количество нормобластов увеличилось в 2 раза. При 200–250 мг/л отмечено увеличение лимфоцитов и бластных форм (до 14%). При концентрациях <200 мг/л бластные формы не превышали 5%. При 200–250 мг/л снижено число нейтрофилов, единичны эозинофилы. При 30–120 мг/л наблюдались нейтрофилия, эозинофилия и лимфопения. Печень при 200 и 250 мг/л – бледная и рыхлая. Концентрация 60 мг/л снижала интенсивность питания; 200 и 250 мг/л вызывали патологии печени, слабую насыщенность кровью жабр, увеличение печени и желчного пузыря. Негативное влияние на жаберную ткань отмечено с 15 мг/л. При 30 мг/л – гиперплазия и фиброз эпителия; при 40 и 60 мг/л – значительная гиперемия; при 120 мг/л – искривление ламелл; при 200 мг/л – усиление гиперплазии; при 250 мг/л – срастание ламелл и разрастание хрящевой ткани жабр. При 120 мг/л в печени – скопления лимфоцитов; при 200 мг/л – ухудшение состояния печени. *Концентрация натрия азотнокислого, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 12 мг N-NO₃/л (лимитирующий показатель – гистология: жаберная ткань).*

Влияние гидрофосфата натрия на гидробионтов в воде из верховьев р. Нотика. Достоверные отклонения оптической плотности водорослей наблюдались при ≥0,75 мг P/л с 3-х суток (рисунок 1).

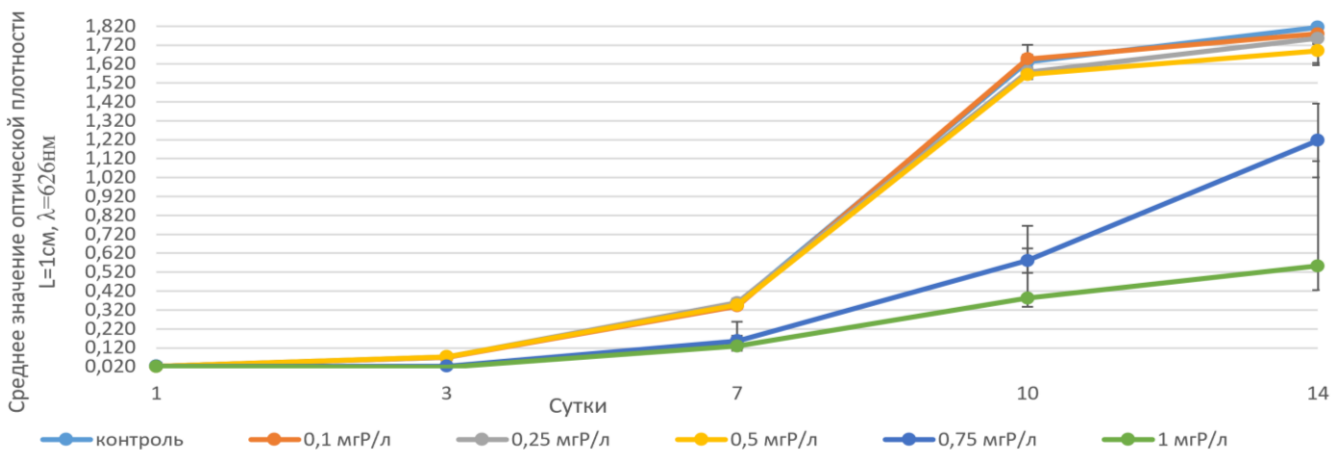


Рисунок 1 - Динамика изменения оптической плотности водорослей *Sc. quadricauda* при различных концентрациях гидрофосфата натрия (в пересчете на P)

Выживаемость рачков оставалась на уровне контроля при 2,5–50 мг P/л. Достоверное снижение плодовитости у поколения F3 отмечено при 25 и 50 мг/л.

У *H. azteca* достоверное снижение выживаемости установлено при 0,75 мг/л (с 30 суток) и выше: 1,0 и 5,0 мг/л (с 7 суток). При 0,5–2,5 мг Р/л выживаемость эмбрионов и выклев личинок составили 90–100%. При 5,0 мг/л выявлены достоверные отличия по выживаемости личинок. Начиная с 1,0 мг/л появлялись эозинофилы. При 2,5 и 10 мг/л отмечено увеличение эритроцитов с нарушениями и зрелых нейтрофилов. При 10 мг/л – кровоизлияния во внутренних органах. Гистология жабр в норме при 0,5 мг/л; при 1,0–2,5 мг/л – гиперемия; при 10 мг/л – утолщение терминалий и гиперплазия хлоридных клеток. Печень в норме при 0,5 мг/л; при остальных концентрациях – жировая дистрофия; при 2,5 и 10 мг/л – фиброзные образования. *Концентрация гидрофосфата натрия, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 0,5 мг Р/л (лимитирующие показатели: оптическая плотность клеток фитопланктона, выживаемость зообентоса, гематологические показатели).*

Влияние сульфата натрия на гидробионтов в воде из верховьев р. Нотика. Достоверные отклонения оптической плотности водорослей наблюдались при ≥ 500 мг SO_4 /л (рисунок 2).

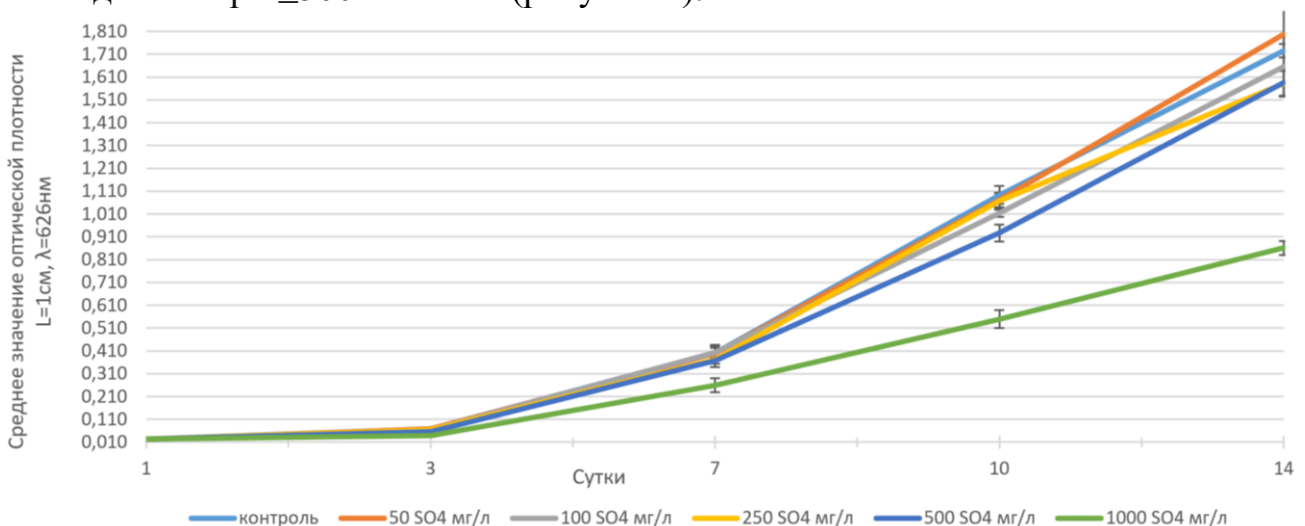


Рисунок 2 - Динамика изменения оптической плотности водорослей *Sc. quadricauda* при различных концентрациях сульфата натрия (в пересчете на SO_4^{2-})

Выживаемость рачков достоверно не отличалась от контроля. Снижение плодовитости отмечено при 750 мг/л. Выживаемость эмбрионов данио составила 90–100% при 100–750 мг/л; при 1000 мг/л – 66,7% (достоверно). Достоверные отличия по выклеву – при ≥ 750 мг/л. На выживаемость взрослых рыб за 30 суток достоверно влияла концентрация 1000 мг/л. С 500 мг/л в крови увеличивалась доля нормобластов, появлялись эозинофилы и базофилы, увеличивалось содержание гранулоцитов. При 750 мг/л – эритроциты с вакуолизированной цитоплазмой и изгибами ядра (таблица 2).

При 1000 мг/л – пожелтение кожного покрова, потеря чешуи, увеличение желчного пузыря в 2–3 раза. Гистология жабр в норме до 750 мг/л; при 1000 мг/л – расширение апикальной области ламелл, гипертрофия эпителия, полнокровие, геморрагии, отек основания ламелл. *Концентрация сульфата натрия, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 250 мг SO_4 /л (лимитирующие*

показатели: оптическая плотность клеток фитопланктона и гематологические показатели).

Таблица 2 - Влияние сульфата натрия (в пересчете на SO_4^{2-}) на выживаемость, выклев и аномалии эмбрионов *D.rerio*

Концентрация, мг/л	Выживаемость, %	Выклев, %	Аномалии, %
100,0	100	100	0,0
250,0	100	100	0,0
500,0	100	100	0,0
750,0	90	83,3	Td=5,0
1000,0	66,7	Td=10,0	60,0

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически достоверные отличия от контроля (Td при $p \leq 0.05$)

Влияние гидрофосфата натрия на гидробионтов в воде из р. Верхняя Ковдора. Достоверные отклонения оптической плотности водорослей отмечены при 2,5 мг Р/л с 10-х суток (рисунок 3).

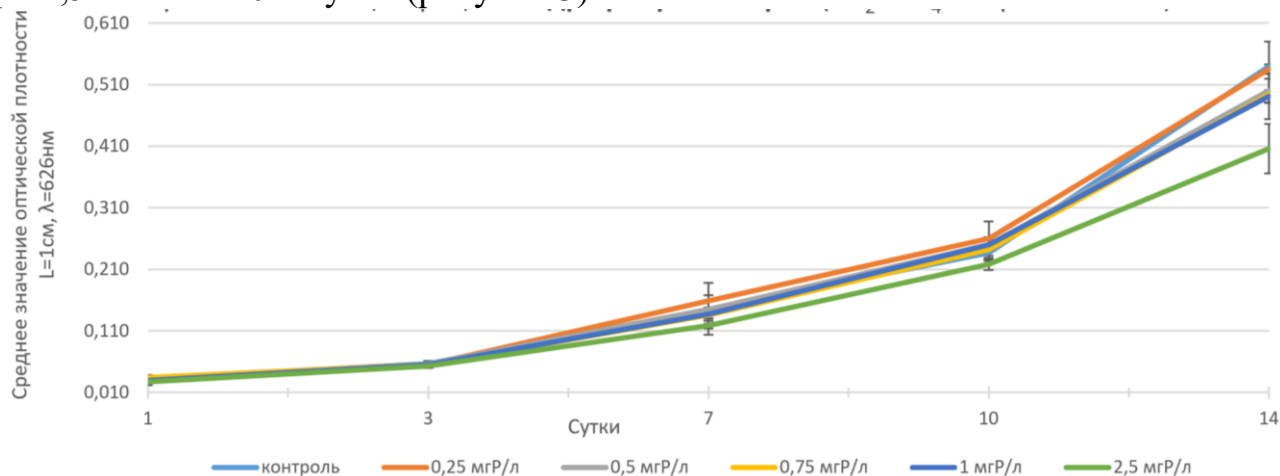


Рисунок 3 - Динамика изменения оптической плотности водорослей *Sc. quadricauda* при различных концентрациях гидрофосфата натрия (в пересчете на Р)

Выживаемость дафний – 100%. Снижение плодовитости – при $\geq 5,0$ мг Р/л. У *N. azteca* достоверное снижение выживаемости – при 2,5 мг/л (на 30 суток). Выживаемость личинок данию – 90–100% при 0,05–25,0 мг/л; при 25 мг/л у 90% личинок отсутствовал плавательный пузырь. На взрослых рыбах достоверное влияние на выживаемость – при 50 мг Р/л (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние гидрофосфата натрия (в пересчете на Р) на выживаемость рыб *D.rerio*

Концентрация, мгР/л	Начальное кол-во особей	Доля погибших особей на концентрацию	Станд. ошибка доли	p_f
Контроль	15	0	0,0625	0
1,0	15	0	0,0625	0
5,0	15	0	0,0625	0
10,0	15	0,133	0,0909	0,241
25,0	15	0,267	0,1182	0,100
50,0	15	0,400	0,1309	0,025

Примечание: p_f - значение точного теста Фишера, жирным шрифтом выделены достоверные отличия от контрольных значений.

Гематологические показатели без значимых изменений во всем диапазоне. Гистология жабр в норме при 1,0 мг/л; при 5,0–10,0 мг/л – гиперемия; при 25,0–50,0 мг/л – утолщение терминалий. В печени при всех концентрациях – жировая дистрофия и очаги гиперемии. *Концентрация гидрофосфата натрия, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 1,0 мг P/л (лимитирующие показатели: оптическая плотность клеток фитопланктона, выживаемость зообентоса).*

Влияние сульфата натрия на гидробионтов в воде из р. Верхняя Ковдора. Достоверные отклонения оптической плотности водорослей – при 500 мг SO₄/л на 3 и 10 сутки. Выживаемость рачков – на уровне контроля. Снижение плодовитости – при ≥300 мг/л. Смертность эмбрионов рыб – не более 10% во всем диапазоне. Снижение выклева – до 17,4% при 550 мг/л, аномалии (23,3%) – также при 550 мг/л. На выживаемость взрослых рыб достоверно влияла только концентрация 1000 мг/л. Достоверное увеличение юных нейтрофилов и моноцитов – при 500 мг/л. Гистология жабр в норме до 250 мг/л; при 500 мг/л – истончение и разрушение эпителия, гиперемия, искривление ламелл. Печень в норме до 250 мг/л; при 500 мг/л – жировая эмболия, разрыхление; при 750–1000 мг/л – фиброз и скопления лейкоцитов. *Концентрация сульфата натрия, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 200 мг SO₄/л (лимитирующий показатель: плодовитость зоопланктона).*

Влияние натрия азотистокислого на гидробионтов в воде из р. Белая. Достоверные отклонения оптической плотности водорослей – при ≥1,5 мг N-NO₂/л. Выживаемость и плодовитость рачков – без достоверных отличий при 0,03–0,8 мг/л. При 5 и 10 мг/л – достоверное увеличение смертности икринок (выживаемость эмбрионов при 10 мг/л – 73,3%) и снижение выживаемости предличинок (при 10 мг/л – 66,6%). Взрослые рыбы: достоверная гибель при 4 мг/л за 48 ч; при 10, 20 и 40 мг/л за 96 ч выживаемость составила 53,3; 30,6 и 13,3% соответственно. При хроническом воздействии достоверная гибель отмечена при 10 мг/л с 3 суток, при 2,5 и 5 мг/л – с 14 суток; на 30 сутки выживаемость при 5 и 10 мг/л – 63,3 и 43,3%. При 5 и 10 мг/л количество эритроцитов достоверно ниже контроля. При 10 мг/л – увеличение незрелых эритроцитов. На гистосрезах жабр при 10 мг/л – отслоение эпителия и искривление ламелл; при 5 мг/л – аналогичные, но менее распространенные изменения. Структура печени не отличалась от контроля. *Концентрация натрия азотистокислого, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 0,8 мг N-NO₂/л (лимитирующий показатель: оптическая плотность клеток фитопланктона, выживаемость и плодовитость зоопланктона).*

Влияние бромида натрия на гидробионтов в воде из р. Белая. Достоверные отклонения оптической плотности водорослей – при 5,0 мг Br/л на 7 сутки (рисунок 4).

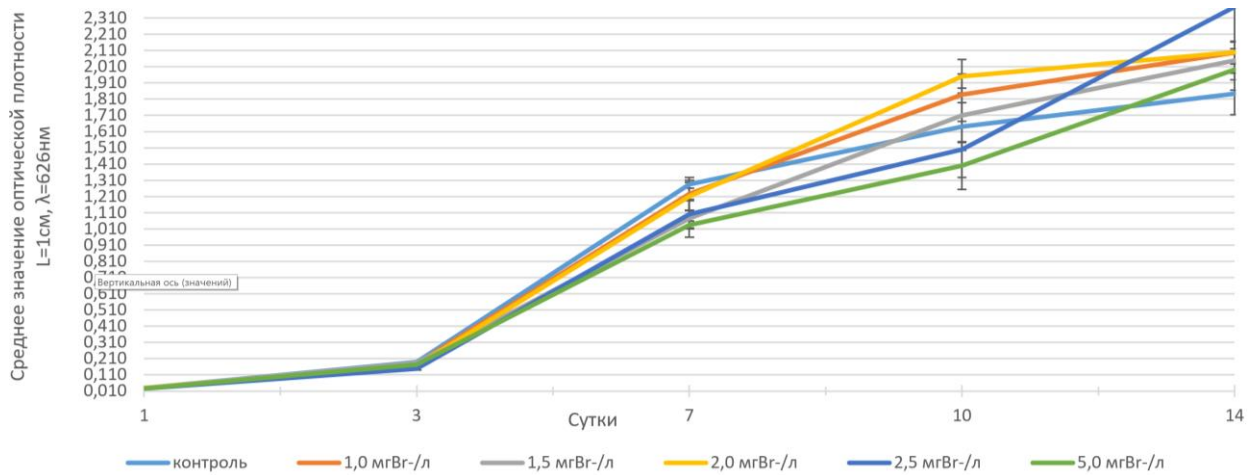


Рисунок 4 - Динамика изменения оптической плотности водорослей *Sc. quadricauda* при различных концентрациях бромид натрия (в пересчете на Br)

Выживаемость рачков без изменений. Снижение плодовитости – при $\geq 5,0$ мг/л. У *H. azteca* достоверное снижение выживаемости – при $\geq 10,0$ мг/л. На эмбриогенез данио достоверного влияния не выявлено; выживаемость икры при 300 мг/л – 90%. При 300 мг/л отмечено нарушение выклева (17,8% не освободились от оболочки). На предличинках – недостоверное снижение выживаемости при 200 и 300 мг/л. У взрослых рыб гибель отмечена при 300 мг/л с 3 суток. При 200 и 300 мг/л выявлены изменения в соотношении зрелых и незрелых эритроцитов. Лейкоцитарная формула без изменений. При 300 мг/л – незначительные изменения структуры вторичных ламелл жабр и вакуолизация гепатоцитов. *Концентрация бромид натрия, не вызывающая отклонений у всех организмов, - это 2,5 мг Br/л (лимитирующие показатели: оптическая плотность клеток фитопланктона, плодовитость зоопланктона).*

Оценка сравнительного действия различных солей натрия на представителей гидробиоценоза. Природное содержание сульфатов в воде заметно отличается от водотока к водотоку (таблица 4). В верховье р. Нотика содержание сульфатов в меженный период составляло 43 ± 20 мг/л, в р. В. Ковдора - менее 20 мг/л, в реке Белая оно было незначительным и составило всего $8,1 \pm 1,6$ мг/л. Что касается фосфатов, то их содержание также колебалось, но не так значительно: по сравнению с сульфатами в воде р. Нотика содержание фосфатов составило 0,037 мг/л, в р. В. Ковдора - $0,05 \pm 0,008$ мг/л, в р. Белая - менее 0,5 мг/л (ниже предела обнаружения методики). Самое большое содержание нитритов было отмечено в воде р. Белая – 0,08 мг/л, в воде р. В. Ковдора содержание нитритов колебалось в диапазоне 0,002 – 0,02 мг/л, меньше всего нитритов было отмечено в воде верховья р. Нотика – 0,0017 мг/л. По нитратам картина была несколько иная, максимальное содержание нитратов отмечалось в воде верховья р. Белая - $2,16 \pm 0,43$ мг/л, затем в верховье р. Нотика – 0,18 мг/л и самое незначительное количество (менее 0,1 мг/л) было отмечено в воде р. В. Ковдора. Содержание бромидов определялось только в воде верховья р. Белая и составило менее 0,05 мг/л – ниже предела обнаружения методики. Очень много в воде из верховья р. Нотика натрия и калия. Содержание натрия здесь достигало 180 ± 15 мг/л, калия – 11 мг/л, в воде р. Белая содержание натрия было $2,6 \pm 0,06$ мг/л, калия

- $0,8 \pm 0,02$ мг/л, в воде р. В. Ковдора еще меньше (таблица 4). Аналогичная картина наблюдалась и в отношении магния, больше всего его обнаруживалось в воде верховья р. Нотика - 33 ± 15 мг/л, убывало его содержание в верховье р. Белая - $6,17 \pm 0,13$ мг/л и совсем незначительное количество отмечалось в воде р. В. Ковдора - $1,8 \pm 0,3$ мг/л (таблица 4).

При внесении сульфата натрия в воду из верховьев р. Нотика и в воду из р. В. Ковдора картина токсичности изменялась незначительно. Концентрация, описанная как недействующая, составила 250 мг/л в первом случае и 200 мг/л во втором случае (в воде из р. В. Ковдора). При концентрации 750 мг $\text{SO}_4/\text{л}$ были установлены статистически значимые отклонения значений относительно контроля по плодовитости рачков в воде из верховьев реки Луга, в то время как статистически значимые отклонения по плодовитости рачков были установлены при концентрации этой же соли 300 мг $\text{SO}_4/\text{л}$ в воде р. В. Ковдора.

Таблица 4 – Природное (фоновое) содержание исследуемых веществ в водотоках

Вещество	Водоток	Концентрация, мг/л
сульфаты	р. Нотика	43 ± 20
	р. В. Ковдора	менее 20
	р. Белая	$8,1 \pm 1,6$
фосфаты	р. Нотика	0,037
	р. В. Ковдора	$0,05 \pm 0,008$
	р. Белая	менее 0,5
нитриты	р. Нотика	0,0017
	р. В. Ковдора	0,002 – 0,02
	р. Белая	0,08
нитраты	р. Нотика	0,18
	р. В. Ковдора	менее 0,1
	р. Белая	$2,16 \pm 0,43$
бромиды	р. Нотика	-
	р. В. Ковдора	-
	р. Белая	менее 0,05
натрий	р. Нотика	180 ± 15
	р. В. Ковдора	1,9
	р. Белая	$2,6 \pm 0,06$
калий	р. Нотика	11
	р. В. Ковдора	менее 1,0
	р. Белая	$0,8 \pm 0,02$
магний	р. Нотика	33 ± 15
	р. В. Ковдора	$1,8 \pm 0,3$
	р. Белая	$6,17 \pm 0,13$

Несмотря на присутствие в воде р. Нотика дополнительного количества сульфатов 43 ± 20 мг/л, вода из нее оказалась менее токсична для *Sc. quadricauda*, чем вода из р. В. Ковдора, в которой природное содержание сульфатов менее 20 мг/л. В отношении фосфатов менее токсичной для организмов оказалась вода из р. В. Ковдора. При проведении испытаний с водорослью *Sc. quadricauda* дополнительное внесение фосфата оказывало действие в концентрации 2,5 мг/л в

воде р. В. Ковдора, при этом в воде из р. Нотика достоверное влияние на *Sc. quadricauda* было отмечено уже при 0,75 мг/л. Такая же картина наблюдалась на эмбриональной и постэмбриональной стадии рыб и у рыб во взрослом состоянии. Более чувствительным к ковдорской воде оказались *D. magna*: воздействие на них было отмечено уже в концентрации 5 мг/л, между тем, в воде из р. Нотика действие на *D. magna* проявлялось в более высокой концентрации – 25 мг/л. При внесении натрия азотистокислого в воду из верховья р. Нотика и в воду р. Белая было отмечено, что вода реки Нотика становится более токсичной для всех тест-организмов. Достоверно недействующая концентрация натрия азотистокислого в 10 раз отличается в изученных водах, более низкое ее значение установлено для вод р. Нотика – 0,03 мг/л. Азотистокислый натрий, начиная с концентрации 0,2 мг N-NO₂/л, оказывал влияние на все показатели у ракообразных, содержащихся в воде р. Нотика, но при этом в максимальной из оцениваемых концентрации 0,8 мг N-NO₂/л не действовал на *D. magna* по тем же показателям в воде из верховьев р. Белая. Азотнокислый натрий влиял на ракообразных с концентрации 45 мг N-NO₃/л и выше, отмечались достоверные отличия по плодовитости у поколений F1 и F2 по сравнению с контролем. Только в двух вариантах из трех экспозиций *H. azteca* показала высокую чувствительность к вносимым солям, чего нельзя сказать при воздействии бромида натрия (таблица 5).

Таблица 5 – Недействующие концентрации солей (мг/л) для гидробионтов в воде разных водотоков

Соль	Водный объект	<i>Sc. quadricauda</i>	<i>D. magna</i>	<i>H. azteca</i>	<i>D. rerio</i>		Недействующая концентрация
					Икра, личинки	Взрослые	
NaNO ₂	Нотика	0,2	0,1	-	0,03	0,08	0,03
	Белая	0,8	0,8	-	2,5	1,0	0,8
NaNO ₃	Нотика	30,0	30,0	-	50	12,0	12,0
Na ₂ SO ₄	Нотика	250	500	-	500	250	250
	В. Ковдора	400	200	-	250	250	200
Na ₂ HPO ₄	Нотика	0,5	10	0,5	2,5	0,5	0,5
	В. Ковдора	1,0	2,5	1,0	10,0	5,0	1,0
NaBr	Белая	2,5	2,5	5,0	200	100	2,5

Самые токсичные соли для рыб *D. rerio* – это азотистокислый натрий и гидрофосфат натрия, особенно это была ярко выражено при гистологическом анализе. Как уже отмечалось, концентрация 0,08 мг N-NO₂/л оказалась недействующей для взрослых рыб, а уже 0,16 мг N-NO₂/л оказывала патологическое действие, как на жаберную ткань, так и на состояние печени. Гистологическая картина жабр из контроля и при концентрации гидрофосфата 0,5 мг P/л соответствовала норме. У рыб при концентрации 1,0 и 2,5 мг P/л в жабрах выявлена гиперемия респираторного эпителия. Печень данио из контрольной группы и концентрации 0,5 мг P/л также в целом соответствовала норме. При всех остальных концентрациях в печени выявлена жировая дистрофия. По степени убывания токсичности солей натрия можно ранжировать следующим образом: NaNO₂ (для вод р. Нотика), Na₂HPO₄ (для вод р. Нотика), NaNO₂ (для вод р.

Белая), Na_2HPO_4 (для вод р. В. Ковдора), NaBr (для вод р. Белая), NaNO_3 (для вод р. Нотика), Na_2SO_4 (для вод р. В. Ковдора), Na_2SO_4 (для вод р. Нотика). Показано, что токсичность вещества зависит не только от вносимого аниона, но и от состава самой воды.

Различия в токсичности солей натрия в исследованных природных водах обусловлены комплексным взаимодействием трех групп факторов: специфическими молекулярными механизмами действия анионов (окисление гемоглобина нитритами, нарушение Ca^{2+} -гомеостаза фосфатами, осмотический дисбаланс сульфатами); модифицирующим влиянием жесткости воды, проявляющимся в конкуренции $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ с токсичными ионами за общие транспортные системы жаберного эпителия (ионные каналы, АТФазы, котранспортеры), а также в стабилизации мембранных структур; эффектом предварительной адаптации к фоновому содержанию анионов.

Выявленные закономерности объясняют, в частности, парадоксальное повышение токсичности нитритов в жесткой воде р. Нотика (за счет специфического механизма, не защищаемого Ca^{2+}) и усиление токсичности фосфатов в той же воде (за счет образования коллоидных фосфатов кальция).

Токсичность солей натрия в природных водах определяется сложным взаимодействием специфических механизмов действия анионов и модифицирующим влиянием гидрохимических параметров воды (жесткости, ионной силы, фонового содержания ионов). Это объясняет, почему одна и та же соль может иметь во много раз различающиеся недействующие концентрации в разных водотоках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1). Азотистокислый и азотнокислый натрий оказывали схожее влияние на фитопланктон и зоопланктон в водах рек Нотика и Белая. Сульфат натрия наиболее негативно сказался на водорослях из верховьев реки Нотика и на рачках из реки В. Ковдора. Ракообразные в водах рек Нотика и В. Ковдора продемонстрировали большую устойчивость к гидрофосфату натрия по сравнению с водорослями. Воздействие бромида натрия на рачков и водоросли было одинаковым в различных водных средах. Для обоих видов не оказывающая влияния концентрация составила 2,5 мг/л.

2). Начиная с концентрации 25,0 мг Р/л, гидрофосфат натрия оказывал негативное влияние на плодовитость рачков в третьем поколении (F3) при использовании воды из верховья реки Луга. В воде реки В. Ковдора статистически значимые изменения были зафиксированы уже при концентрации 5 мг Р/л.

3). В некоторых случаях ранние стадии развития рыб оказались наиболее чувствительными к воздействию солей. Например, при исследовании влияния азотистокислого натрия на рыб в воде из верховьев реки Нотика, в максимальных изученных концентрациях (1,0 и 2,5 мг N- NO_2 /л) смертность превышала контрольные значения, достигая 23,3% и 36,7% соответственно. Общая

выживаемость личинок рыб, начавших активно питаться, отличалась от контрольных показателей при концентрациях 0,5 мг N-NO₂/л и выше.

4). Сравнительный анализ токсичности солей с одинаковым катионом (натрий) и различными анионами для одноклеточной водоросли *S. quadricauda* (фитопланктон) и ракообразного *D. magna* (зоопланктон) показал, что токсичность зависит от свойств и состава воды в природных водоемах. Наиболее токсичной солью оказался азотистокислый натрий, не оказывающий влияния в концентрации 0,03 мг/л.

5). Соли натрия, ранжированные по убыванию токсичности в природных водах, выглядят следующим образом: азотистокислый натрий (для вод р. Нотика), гидрофосфат натрия (для вод р. Нотика), азотистокислый натрий (для вод р. Белая), гидрофосфат натрия (для вод р. В. Ковдора), бромид натрия (для вод р. Белая), азотнокислый натрий (для вод р. Нотика), сульфат натрия (для вод р. В. Ковдора), сульфат натрия (для вод р. Нотика). Определение токсичности вещества в водной среде требует учета не только его химической структуры, но и физико-химических параметров самой воды. В связи с этим, при нормировании содержания потенциально токсичных веществ в природных водах, целесообразно опираться на региональные стандарты.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

На основе выполненных исследований предложены следующие практические рекомендации для совершенствования системы нормирования качества вод и проведения токсикологического мониторинга:

1. При разработке региональных нормативов ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения необходимо учитывать не только вид нормируемого вещества, но и природный гидрохимический состав воды (минерализацию, жесткость, фоновое содержание катионов и анионов), поскольку токсичность одного и того же соединения может существенно различаться в разных водных объектах.

2. Для обоснования нормативов загрязняющих веществ двойного (природно-антропогенного) генезиса следует использовать комплекс тест-организмов, представляющих основные трофические уровни водных экосистем: фитопланктон, зоопланктон, зообентос и рыб на разных стадиях онтогенеза. Это обеспечивает экосистемный подход и повышает экологическую обоснованность нормативов.

3. При установлении региональных нормативов для солей натрия рекомендуется определять наиболее чувствительный анион в составе соли и устанавливать норматив по лимитирующему показателю, выявленному при действии этого аниона. В исследованных природных водах наибольшей токсичностью обладали нитрит-ион (для вод с низкой минерализацией) и фосфат-ион (для вод с высоким содержанием натрия и калия).

4. Для повышения надежности токсикологических исследований в рамках разработки региональных ПДК целесообразно включать оценку отдаленных эффектов (не менее трех поколений для *Daphnia magna*) и использовать

гистологические и гематологические показатели у рыб как наиболее чувствительные биомаркеры хронического токсического действия.

5. Рекомендуется применять выклев предличинок *Danio rerio* в качестве наиболее чувствительного тест-параметра при оценке токсичности солей на ранних стадиях развития рыб, что позволяет сократить длительность экспериментов без потери информативности.

6. Для совершенствования мониторинга качества вод целесообразно использовать предложенный в работе подход ранжирования солей по степени их токсичности в конкретных природных условиях, что позволяет приоритезировать контролируемые показатели в зависимости от региона.

7. Материалы диссертации могут быть использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по направлениям «Водная токсикология», «Санитарная гидробиология», «Биотестирование природных и сточных вод», а также в системе повышения квалификации сотрудников лабораторий, осуществляющих экологический мониторинг и нормирование качества вод.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Изложенные в работе результаты исследований демонстрируют необходимость и целесообразность разработки региональных нормативов и совершенствования действующих методических указаний по разработке ПДК (Методические..., 2009). Необходимо продолжать работу по утверждению предложенных в работе рекомендаций соответствующими компетентными органами власти. Разработка региональных ПДК для различных природных зон может значительно улучшить ситуацию управления водными ресурсами с оценкой максимальной допустимой нагрузки ЗВ двойного генезиса, при которой не оказывается статистически достоверное негативное воздействие ни на одно из звеньев трофической цепи в водной среде (Российские..., 2023).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертации опубликовано 16 научных работ. Ниже представлены основные работы.

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки

1. Тригуб А.Г., Медянкина М.В., Дрозденко Т.В., Хайрулина Т.П. Влияние некоторых загрязняющих веществ на нектобентических ракообразных // Водные биоресурсы и среда обитания. - 2024. - Т. 7, № 1. - С. 18–26.

2. Тригуб А.Г., Медянкина М.В., Дрозденко Т.В. Сравнительная оценка влияния солей натрия на гидробионты на примере некоторых водотоков // Вестник Дагестанского научного центра. - 2024. - №95. - С. 31-36.

Публикации в других периодических изданиях

3. Медянкина М.В., Соколова С.А., Оганесова Е.В., **Тригуб А.Г.**, Дмитриева Е.С. О проблемах установления нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения // Водоснабжение и санитарная техника. - 2017. - №10. - С. 12-18.

4. Медянкина М.В., Зайцева Ю.Б., **Тригуб А.Г.** Региональное нормирование показателей качества воды // Контроль качества продукции. - 2019. - №8. - С.50-53.

5. Медянкина М.В., **Тригуб А.Г.**, Глебова И.А., Салахов Е.М. Пересмотр ПДК сульфатов для воды водных объектов рыбохозяйственного значения. Часть 1. Влияние на водные организмы // Контроль качества продукции. - 2022. - №5. - С. 25-29.

6. Медянкина М.В., Тригуб А.Г., Хазанова К.П., Акулова А.Ю. Разработка (пересмотр) норматива ПДК сульфатов для воды пресноводных объектов рыбохозяйственного значения. Часть 2. Влияние на состояние водной среды // Контроль качества продукции. - 2022. - № 6. - С. 27-30.

7. Тригуб А. Г., Фалий С.С., Медянкина М.В., Дрозденко Т. В. Воздействие разных концентраций сульфата калия на молодь *Danio rerio* // Рыбоводство и рыбное хозяйство. - 2023. - Т. 17, № 7(210). - С. 479-489.

8. Попова Е. О., Медянкина М. В., **Тригуб А. Г.** Методические подходы в Российской Федерации к разработке нормативов ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения с учетом их природных особенностей // Труды Института биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина Российской академии наук. - 2024. - №. 107. - С. 36-41.

Публикации в сборниках научных мероприятий

9. **Тригуб А.Г.**, Дмитриева Е.С. Нормирование загрязняющих веществ для сохранения водных биологических ресурсов и качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения // Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов: труды междунар. науч. конф. IV Балтийского морского форума (24 - 25 мая 2016 г.; г. Калининград) / Калининград. гос. техн. ун-т. - Калининград: КГТУ, 2016. - С. 228 – 230.

10. Оганесова Е.В., **Тригуб А.Г.**, Дмитриева Е.С., Медянкина М.В. К вопросу о необходимости нормирования загрязняющих веществ для сохранения водной среды // III Международная конференция "Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века", Казань, Russia, 27-29 сентября 2017. – С. 437-438.

11. Житкова А.А., **Тригуб А.Г.**, Пачулия В.Б, Денисюк А.В. Воздействие некоторых сульфатных солей на стандартном тест-объекте *Daphnia magna* // Материалы IX международной научно-практической конференции. - Ставрополь: СтГМУ, 2023. - С. 184-187.

12. Денисюк А.В., **Тригуб А.Г.**, Житкова А.А., Пачулия В.Б Воздействие сульфатов на зеленые одноклеточные водоросли *Scenedesmus quadricauda* // Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации. - Пенза: МНИЦ ПГАУ, 2023. - С. 343-346.

13. Пачулия В.Б., **Тригуб А.Г.**, Житкова А.А., Денисюк А.В. Влияние кобальта на некоторые гидрохимические показатели и процессы самоочищения водной среды на примере р. Белая // в сборнике: Биотехнология: взгляд в будущее. Материалы IX международной научно-практической конференции. 2023. С. 184-188.

14. Пачулия В.Б., Денисюк А.В., Житкова А.А., **Тригуб А.Г.** Влияние модельного раствора одноклеточных водорослей, имитирующих цветение, на некоторых гидробионтов // в сборнике: Биодиагностика и экологическая оценка окружающей среды: современные технологии, проблемы и решения. Материалы IV международного симпозиума (Москва, 28-31 августа 2023 г.). 2023. С. 189-195.

15. Житкова, А. А. Изучение влияния процентного соотношения сред Прата и Тамия на рост водоросли *Chlorella vulgaris* / А. А. Житкова, В. Б. Пачулия, **А. Г. Тригуб** // АналитБиоПрибор-2024: Тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2024. – С. 199-200.

16. Оценка влияния хлорида железа (III) на водоросль *Chlorella vulgaris* / Е. А. Простомолотова, В. Б. Пачулия, А. А. Житкова, **А. Г. Тригуб** // АналитБиоПрибор-2024: Тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2024. – С. 202-204.

Подписано в печать «06» апреля 2026 г.

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

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в: ООО Фирма "Реглет"

105484, г. Москва, Сиреневый б-р, д.72

тел.: 8 (495) 966-23-96 доб. 38; 8 (495) 142-99-76

e-mail: info@reglet.ru