

На правах рукописи

НГУЕН ТХИ ТХУИ НЬУНГ

**ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ И ТРАНСФОРМАЦИИ РТУТИ В
ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ
(ВЬЕТНАМ)**

Специальность 1.5.15. – Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Махачкала – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Астраханский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Волкова Ирина Владимировна**, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры гидробиологии и общей экологии, заместитель директора Института рыбного хозяйства, биологии и природопользования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Тютиков Сергей Фёдорович**, доктор биологических наук, старший научный сотрудник по кафедре экологии и охотоведения, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

Зубкова Валентина Михайловна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры экологии и природоохранной деятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный социальный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

Защита состоится 17 июля 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.267.ХХ (24.1.477.02) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук по адресу: 367032, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 45, конференц-зал (каб. 207).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке по адресу: 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 75 и на официальном сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук <http://www.dncran.ru/static?id=%20174>, а также на сайте ВАК Минобрнауки РФ: vak.minornauki.gov.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Г. А. Садыкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ртуть является высокотоксичным элементом первого класса опасности. Особенности характеристики ртути являются разнообразие форм существования и способность к миграции и трансформации в различных компонентах окружающей среды [Lindberg, 2007; Лобус, 2011]. Формы существования и нахождения ртути определяют токсическое действие на биологические организмы, в частности, человека [Barwick, 2003]. В окружающую среду ртуть попадает из природных и антропогенных источников [Дымникова, 2012; Аксентов, 2015]. Устьевая область р. Красная – одна из крупнейших во Вьетнаме, на территории которой существуют потенциально возможные источники соединений ртути: как местные – промышленные предприятия, сжигание и размещение отходов, сточные воды, – так и региональные и глобальные эмиссии ртути (из Европы, Америки и Северной Азии) [Li, 2010]. В настоящее время ртутное загрязнение рассматривается как серьезная проблема в устьевой области р. Красная. Получение новых научных данных о биогеохимических особенностях и закономерностях миграции и трансформации ртути в системе «вода – донные отложения – гидробионты» в устьевой области р. Красная необходимо при определении, оценке и прогнозировании уровня загрязнения ртутью водных экосистем, а также при решении вопросов, связанных с возможностью безопасного водопользования в устьевой области р. Красная.

Степень разработанности темы.

За последние несколько десятилетий проблемам загрязнения водной среды ртутью посвящены труды вьетнамских, русских и иностранных авторов. В этих работах, в частности, отражены уровни содержания ртути в воде р. Бак Данг [Сао, 2009; Nguyen, 2014] и в донных отложениях различных рек и водохранилищ Вьетнама [Dao, 1998; Le, 1998], а также в двустворчатых моллюсках в устьевых областях р. Бак Данг (Северный Вьетнам) [Le, 2018; Чыонг, 2019]. Значения содержания ртути в воде, донных отложениях и мышечной ткани рыб в водоемах Центрального и Южного Вьетнама более низкие по сравнению с водоемами умеренных широт [Лобус, 2014]. Однако описанные результаты касаются малых рек и водохранилищ, где источники поступающей ртути локальны и не отражают картину загрязнения водной среды ртутью в целом по Вьетнаму. Исследования распределения ртути в устьевой области рек дают региональную оценку масштабам загрязнения ртутью, а также информацию о пространственном распределении данного гидрополлютанта из Северной и Восточной Азии.

Измерения ртути в воде, донных отложениях и тканях гидробионтов атомно-адсорбционным методом еще не реализованы во многих лабораториях Вьетнама из-за сложности и высокой стоимости анализов. Следует отметить, что отсутствие моделей регрессий и карт пространственного распределения ртути в различных исследованиях приводит к неточности прогнозирования содержания ртути в окружающей среде.

Исследования аккумуляции ртути в гидробионтах Северо – Западных водоемов [Немова, 2014], Европейской части России [Комов, 2019] и Каспийского моря [Чаплыгин, 2016] подтверждены корреляционными взаимосвязями между содержанием ртути в тканях гидробионтов и рН, уровнем трофности водоема и трофическим уровнем пищевой цепи. Однако, такие взаимосвязи не всегда точны для тропических гидробионтов в устьевой области р. Красная. В литературе отсутствуют описания проведения широкомасштабных комплексных исследований устьевой области р. Красная, особенно зоны маргинального фильтра, где важно выявить степень бионакопления и биомагнификации ртути тропическими гидробионтами и перераспределение данного металла на исследуемой акватории.

Цель работы – исследование особенностей миграции разнообразных форм ртути в системе «вода – донные отложения – гидробионты» в устьевой области реки Красная (Вьетнам).

Задачи исследования:

1. Дать гидролого-гидрохимическую характеристику устьевой области р. Красная, в которой происходят миграция и трансформация ртути.

2. Определить пространственно-временные особенности распределения миграционных форм ртути в системе «вода – донные отложения» устьевой области реки Красная.

3. Определить доминирующие формы миграции ртути в экосистеме района исследования.

4. Проанализировать влияние зоны маргинального фильтра устьевой области реки Красная на трансформацию и миграцию ртути.

5. Оценить уровни бионакопления и биомагнификации ртути в пищевых цепях экосистемы устьевой области реки Красная. Выявить распределение ртути в различных тканях и органах рыб и двустворчатых моллюсков.

6. Определить корреляционные зависимости между содержанием миграционных форм ртути в системе «вода – донные отложения – гидробионты» в условиях устьевой области р. Красная.

Научная новизна. Впервые выявлены уровни содержания ртути и взаимосвязи между ее различными миграционными формами в системе «вода – донные отложения – моллюски – рыбы» и параметрами экосистемы в устьевой области р. Красная.

Определены пространственные распределения разных миграционных форм ртути в воде и донных отложениях устьевой области р. Красная.

Исследовано влияние на трансформацию и миграцию ртути зоны маргинального фильтра речной системы р. Красная – залив Бак Бо Восточного моря.

Определены уровни бионакопления и биомагнификации ртути в пищевых цепях экосистемы устьевой области реки Красная.

Впервые построены карты распределения миграционных форм ртути в воде и донных отложениях. Определены регрессионные модели, характеризующие форму связи между концентрациями миграционных форм

ртути и различными параметрами в системе «вода – донные отложения – гидробионты» в устьевой области р. Красная.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты проведенных исследований могут быть использованы в экологическом мониторинге дельты р. Красная и взморья Восточного моря Вьетнама. Материал может являться основой для экологических оценок уровня загрязнения ртутью устьевой области р. Красная. Выявленные закономерности позволят более эффективно планировать мероприятия в системе мониторинга загрязнения ртутью речных, эстуарных и морских вод на водных объектах Вьетнама.

Оценка распределения миграционных форм ртути в экосистеме устьевой области р. Красная может быть проведена с использованием регрессионных моделей, при этом, появляется возможность определения ртути в различных компонентах экосистемы при отсутствии лабораторных экспериментов. Кроме того, созданные регрессионные модели дают возможность прогнозировать уровень загрязнения водной среды ртутью в любой момент наблюдения, в конкретной экологической ситуации и, как следствие, уменьшать негативные последствия, сокращать экономические затраты и время.

Методы исследования, полученные результаты и научные выводы рекомендованы при подготовке и чтении курса лекций и практических занятий специальных дисциплин «Химическая экология», «Экологическое картографирование», «Экологическое моделирование», «Экологическая токсикология», «Экологический мониторинг» во Вьетнамском морском университете (Вьетнам).

Методология и методы исследования. В работе применено комплексное использование современных приборных методов гидрохимического, морфологического, биохимического анализа, направленные на оценку уровня содержания ртути в воде, донных отложениях, гидробионтах. Результаты исследования подвергались обработке статистическими методами с использованием специализированных программных пакетов SPSS 26 и STATGRAPHICS Centurion XVIII. Пространственный анализ по теме диссертации выполнен интерполяцией в специализированном программном пакете ArcGIS 10.2.2 (ERSI, USA).

Положения, выносимые на защиту

1. Концентрация ртути в воде устьевой области р. Красная составляет в среднем 4 ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения Вьетнама. Концентрация ртути в донных отложениях водотоков и взморья превышает норматив Вьетнама в 1,68 и 1,34 раза, соответственно.

2. Доминирующая миграционная форма ртути в дельте реки Красная является растворенной, в устьях водотоков и зоне маргинального фильтра – взвешенной, а на взморье, за границами зоны маргинального фильтра – ртуть присутствует в донных отложениях.

3. В зоне маргинального фильтра речной системы «р. Красная – залив Бак Бо» происходит перераспределение ртути по формам нахождения и миграции.

Показано, что 70 % растворенной и 90 % взвешенной ртути удерживаются в данной зоне из-за разрушения ее органокомплексов, образования флоккул, а также за счет сорбции ее на взвешенном веществе с дальнейшим осаждением.

4. Наибольшее содержание ртути в тканях и органах рыб отмечаются в мышечной ткани, а в двустворчатых моллюсках – в гепатопанкреасе. Это отражает присутствие ртути в экосистеме за длительное время.

5. Коэффициент биоаккумуляции ртути гидробионтами возрастает с увеличением солености воды и с повышением трофического уровня организма.

6. На каждом последующем трофическом уровне гидробионтов происходит увеличение накопления ртути в 1,2 – 7,1 раз

Степень достоверности и апробацию результатов исследований осуществлялась ежегодно на конференциях и других научных мероприятиях российского и международного уровня.

Достоверность результатов и обоснованность научных положений подтверждаются большим массивом проанализированных данных полевых исследований, обеспечиваются значительным объемом используемого материала, статистической обработкой полученных данных и применением методов современного пространственного анализа.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (2017 г.); Всероссийских и международных конференциях: Всероссийская междисциплинарная научная конференция «Наука и практика – 2017» (АГТУ, г. Астрахань, 2017г.); III Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли» (г. Владивосток, 2017 г.); Национальная научно-практическая конференция «Наука, образование и инновации в современном мире» (г. Воронеж, 2018г.); Международная научно-техническая конференция «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» ICCATS (г. Челябинск, 2018г.); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения» (г. Юрга, 2018г.); Международная научная конференция «AGRITECH-2019: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» (г. Красноярск, 2019г.); II Всероссийская научно-практическая конференция «Природопользование и устойчивое развитие регионов России» (г. Пенза, 2020г.).

Личный вклад автора в работу. В основу работы положен фактический материал, собранный при выполнении научно-исследовательских работ в период обучения в аспирантуре Астраханского государственного технического университета на кафедре гидробиологии и общей экологии. Отбор проб проводился в 2 сезона (половодье и межень) в течение 2016–2021 гг. в сотрудничестве со специалистами Центра экологии и водостроительства, анализ проб проведен в лабораториях Института экологии Вьетнамского

морского университета. Автор принимала участие в организации и проведении экспедиций, производила отбор и анализ проб. Результаты экспериментальных исследований получены и обработаны лично автором.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы представлено в 21 научных публикациях, в том числе в 8 публикациях в изданиях, входящих в перечень ВАК Российской Федерации; 2 публикации в изданиях, включенных в международные базы данных.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 135 страницах машинного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов, списка литературы и приложения. В список литературы включены 136 наименований литературных источников, в том числе 55 на иностранном языке. Работа иллюстрирована 28 рисунками и содержит 15 таблиц. Приложение представлено на 7 страницах

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Представлен обзор литературных данных по эмиссии ртути из различных источников в окружающую среду Вьетнама, основным процессам, выполняющим наиболее важную роль в миграции и трансформации ртути в водной экосистеме и краткой экологической характеристике устьевой области реки Красная (Вьетнам).

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные работы проводили в период с 2016 по 2021 гг. в лаборатории Инженерной экологии Вьетнамского морского университета. Материал для исследований отбирали и заготавливали на научно-экспедиционной базе Центра экологии и водостроительства и Института экологии Вьетнамского морского университета.

Объектами исследования являлись вода, донные отложения (ДО), 4 вида двусторчатых моллюсков (*Meretrix lyrata*, *Anadara granosa*, *Austriella corrugata* и *Lutraria rhynchaena*) и рыбы устьевой области р. Красная: 6 видов пресноводных рыб – анабас (*Anabas testudineus*), змееголов (*Channa striata*), пресноводный сом (*Clarias batrachus*), сазан (*Cyprinus carpio*), пресноводная сельдь (*Sardinella tawilis*), нильская тиляпия (*Oreochromis niloticus*) – и 6 видов морских рыб – восточная летучка (*Dactyloptena orientalis*), красно-коричневый окунь (*Lutjanus vitta*), индоокеанский бомбиль (*Harpadon nehereus*), темнополосая зубатая барабуля (*Parupeneus barberinus*), восточный тунец (*Euthynnus affinis*) и желто-белый группер (*Epinephelus areolatus*).

Для решения поставленных задач проводились полевые исследования на 37 станциях в дельтовых водотоках (река Красная, проток Чали, проток Нинько, проток Дай) и устьевом взморье реки Красная (рисунок 1). Отбор проб воды, ДО, моллюсков и рыб проводили по общепринятым ГОСТам, TCVN и методикам [ГОСТ 17.1.5.01-80, ГОСТ Р 59024-2020, TCVN 6663-3:2008, Муравьев, 2004] 2 раза в год (в половодье и межени). Общий объем собранного и проанализированного материала составил: проб воды – 518, взвешенного

вещества – 518, донных отложений – 518, общего планктона – 518, фитопланктона – 253, зоопланктон – 264, двустворчатых моллюсков – 560 особей, рыб – 503 особей.

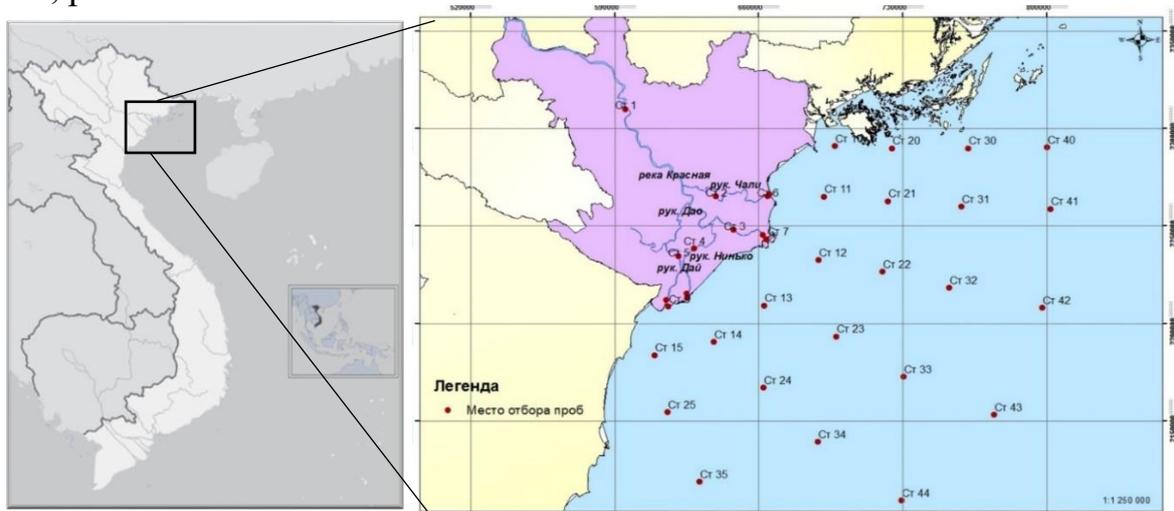


Рисунок 1 – Карта – схема района исследования

Измерение массовой концентрации общей ртути осуществлялось на анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции с приставкой РП-91 [ПНД Ф 14.1:2:4.271-2012; РД 52.18.827-2016; РД 52.18.843-2017]. Для определения $C_{орг}$ во взвешенном веществе и в донных отложениях использовали метод высокотемпературный на приборе LAR AG. Определение температуры в поверхностном и придонном слое воды производили при помощи батометра Нансена. Соленость воды была определена при помощи портативного солемера. Для определения гидрохимических показателей использовалась модель спектрофотометра DR/2010 фирмы HACH.

Степени накопления ртути гидробионтами были рассчитаны посредством коэффициента биологического накопления, представляющего отношение содержания ртути в живых организмах к ее концентрации в воде (K_a) и в донных отложениях (K_d) [Перельман, 1979], и коэффициента биомагнификации (K_b), характеризующего аккумуляцию ртути гидробионтами по пищевым цепям от низших трофических уровней к высшим [Strand, 2005].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием специализированных программных пакетов SPSS 26 и STATGRAPHICS Centurion XVIII при уровне значимости $p < 0,05$.

Пространственный анализ результатов выполнен интерполяцией с использованием метода кригинга в программной среде ArcGIS 10.2.2.

ГЛАВА 3 ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ

3.1 Гидролого-гидрохимическая оценка воды

Установлено, что граница распространения пресных вод (соленость $< 1\%$) находится в дельте реки; основной зоной распределения опресненных вод (соленость 5–22‰) является мелководная часть устьевого взморья; соленые морские воды (соленость 22–30‰) начинают господствовать за 20–30 км от берега в межень и за 40 км в летнее половодье. Температура воды была

достаточно высокая (15–30 °С). Вода всех водотоков и взморья относится к нейтральной и слабощелочной. Концентрация растворенного кислорода колебалась в пределах 5,5–11,2 мг/л в межень и 6,8–7,5 мг/л в летнее половодье. Выявлены превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения: по БПК₅ в 1,5–2,1 раза, по ХПК – в 1,6–2,4 раза, по нитратам до 2,3 ПДК, по фосфатам до 3 ПДК, 10 ПДК для железа, 2 ПДК для меди, 2 ПДК для цинка, 4 ПДК для мышьяка.

3.2 Распределение взвешенного вещества

В устьевой области р. Красная наблюдалось высокое содержание взвешенного вещества (ВВ). Минимальная концентрация ($40 \pm 1,7$ мг/л) была характерна для рукава Дай, а максимальная ($113 \pm 6,2$ мг/л) – для равнинной части р. Красная. На взморье в результате адсорбции и флокуляции также были отмечены высокие значения концентрации ВВ в воде (110 ± 13 мг/л).

3.3 Распределение органического углерода во взвешенных веществах и донных отложениях

Максимальные концентрации взвешенного органического углерода C_v ($2,83 \pm 0,01$ мг/л) приходятся на участок Балат, который наиболее приближен к устью р. Красная. Увеличение концентрации органического углерода здесь обусловлено интенсивным осаждением речных ВВ, обогащенных терригенным органическим веществом, а также развитием здесь фитопланктонного сообщества, обеспечивающего дополнительную поставку планктоногенного органического углерода. В морской части устьевой области концентрация C_v в среднем составляет $0,04 \pm 0,002$ мг/л.

Содержание $C_{орг}$ в донных отложениях устьевой области р. Красная наблюдается в среднем на уровне $1,75 \pm 0,03$ %. Содержание $C_{орг}$ в устьевом взморье составило в среднем $0,75 \pm 0,5$ %.

ГЛАВА 4 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РТУТИ В ВОДЕ – ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ

4.1 Распределение растворенной ртути в воде

Содержание растворенной формы ртути в слое отмечалось на уровне $0,025 \pm 0,02$ мкг/л в межень и $0,055 \pm 0,007$ мкг/л в половодье (рисунок 2).

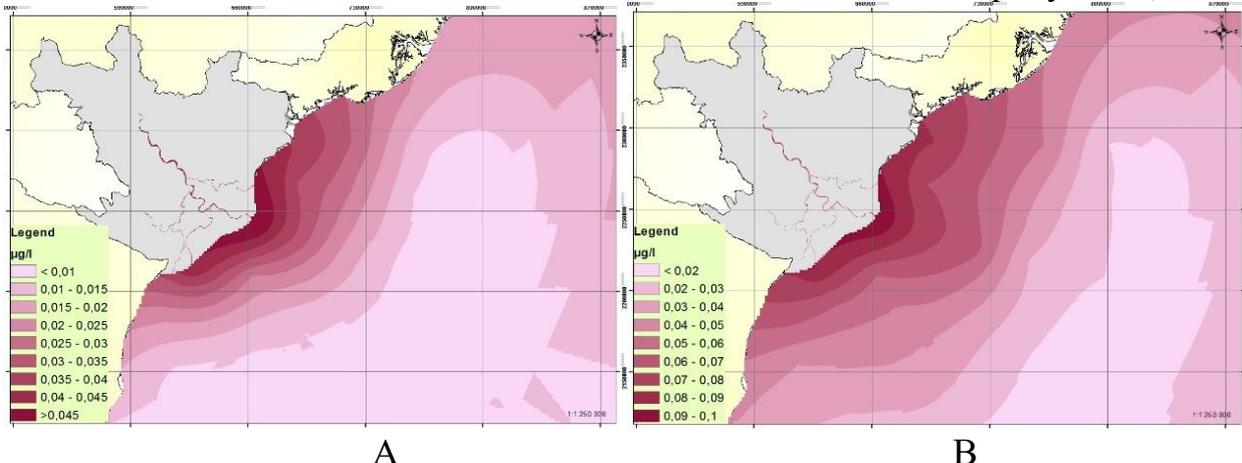


Рисунок 2 – Пространственное распределение растворенной ртути в воде в устьевой области р. Красная: А. в период половодья; В. в межени

Среднее содержание растворенной ртути в воде устьевой области р. Красная в период исследования составило $0,04 \pm 0,028$ мкг/л, что в 4 раза выше ПДК для рыбохозяйственных водоемов. На вершине дельты р. Красная (в г. Вьетчи, где сосредоточены химические предприятия, свалки населенных и промышленных центров) содержание ртути было максимальным ($0,095 \pm 0,021$ мкг/л). Затем концентрации растворенной ртути в воде поверхностного слоя резко снижаются из-за процесса разбавления ртути течением водотоков. Снижение скорости течения, перемешивание речных и морских вод и процесс растворения и разложения органических соединений ртути являются причинами вновь повышающегося содержания растворенной ртути в устье р. Красная ($0,08 \pm 0,01$ мкг/л в период половодья). В зоне взморья содержание общей растворенной ртути отмечено в среднем на уровне $0,03 \pm 0,022$ мкг/л.

Концентрации ртути в придонном и поверхностном слоях воды совпадают в пространственном распределении, однако в зоне маргинального фильтра содержание растворенной ртути в придонном слое воды в 2–3 раза выше, чем в поверхностном. В результате процессов адсорбции ртути во взвешенных веществах и далее нахождения в донных отложениях 70 % от общего содержания растворенной ртути в воде удерживается в зоне маргинального фильтра, что приводит к уменьшению ее концентрации на взморье.

При исследовании взаимосвязи концентрации растворенной ртути с различными параметрами воды обнаружены прямые и достоверные корреляционные зависимости между концентрациями растворенной ртути, температурой воды ($r = 0,67, p < 0,05$), содержанием ХПК ($r = 0,79, p < 0,05$), значением БПК₅ ($r = 0,558, p < 0,05$) и содержанием железа ($r = 0,732, p < 0,05$), обратная и достоверная зависимость выявлена с соленостью ($r = -0,87, p < 0,05$)

4.2 Распределение взвешенной формы ртути в воде

В водах р. Красная содержание взвешенной формы ртути составило $0,4 \pm 0,31$ мкг/л в поверхностном и $0,72 \pm 0,58$ мкг/л в придонном слое воды (рисунок 3).

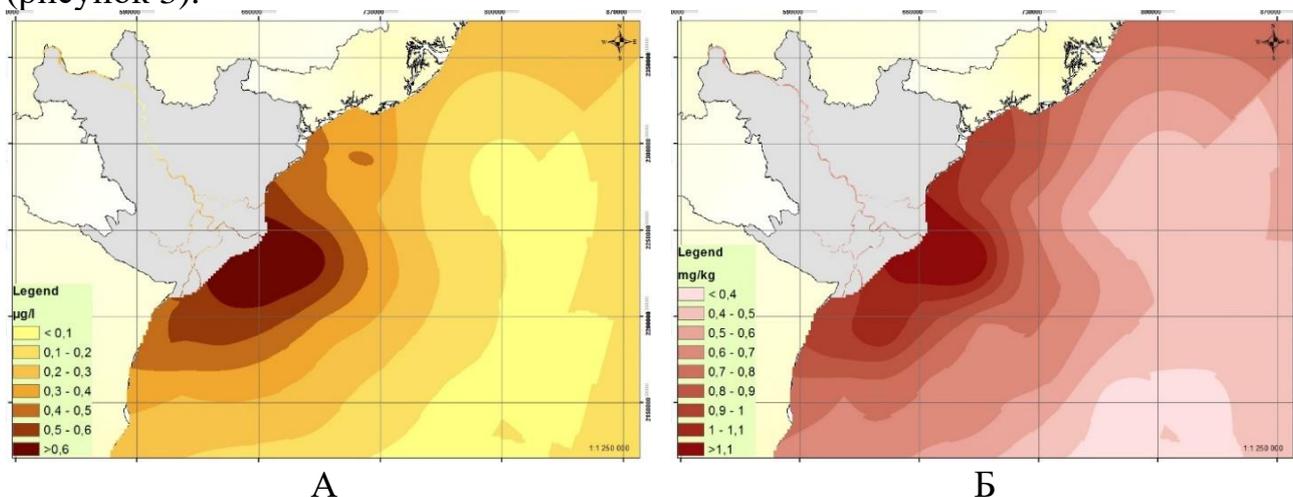


Рисунок 3 – Пространственное распределение взвешенной формы ртути в поверхностном слое воды (А) и в придонном слое воды (Б)

На вершине дельты р. Красная содержание взвешенной формы ртути имело минимальные значения ($0,085 \pm 0,015$ мкг/г с.м. в среднем). Ее концентрация в водотоках постепенно увеличивается по течению и достигает максимума в устье водотоков ($0,6-0,7$ мкг/г с.м. в поверхностном слое и $0,9-1,25$ мкг/г с.м. в придонном слое). Такие максимальные значения наблюдаются до зоны маргинального фильтра на расстоянии 25–30 км от берега, далее, за границей этой зоны, концентрация взвешенной ртути постепенно снижается до $0,08 \pm 0,03$ мкг/г с.м. (в 40 км от берега), что объясняется удержанием 90 % взвешенных веществ с ртутью в зоне маргинального фильтра и процессами самоочищения водной экосистемы от речного материала и переходом к морским условиям.

В большинстве исследуемых станций относительное содержание общей растворенной формы ртути по сравнению с валовой не превышало 50 % валовой, т. е. концентрация растворенной ртути не превышала концентрацию взвешенной формы ртути в воде (рисунок 4).

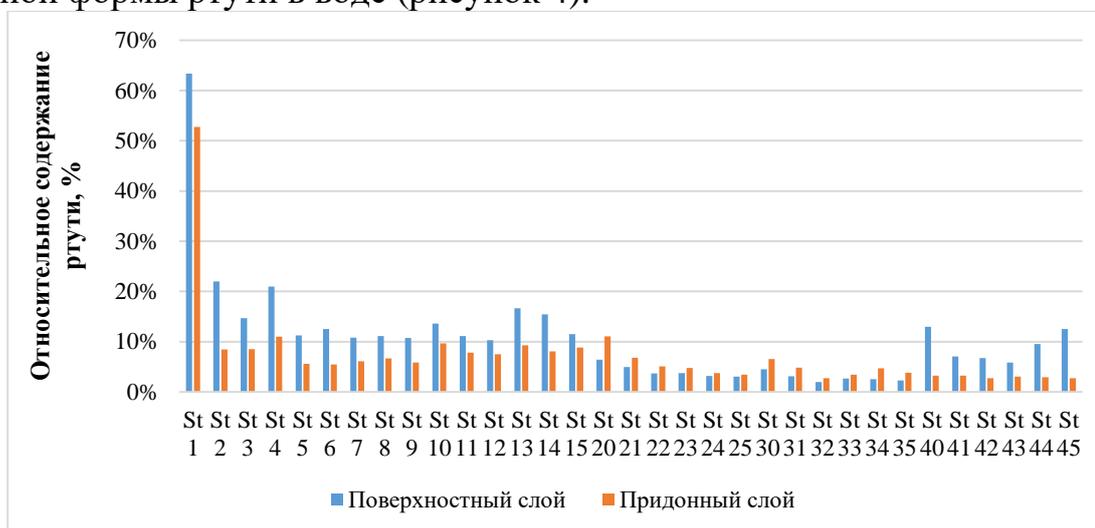


Рисунок 4 – Относительное содержание общей растворенной формы ртути

В дельте реки и протоках это значение изменяется от 11 до 63 %. Наиболее высокие значения относительного содержания растворенной ртути отмечены в г. Вьетчи (63 %), протоках Ча Ли (22 %) и Нинь Ко (21 %). На взморье основная часть ртути мигрирует во взвешенном веществе. Здесь относительное содержание растворенной ртути наблюдалось от 2 до 8 %.

Итак, миграция ртути в устьевой области р. Красная происходит преимущественно во взвешенной форме, лишь на вершине дельты наблюдается превалирование растворенной формы над взвешенной. С глубиной увеличивается роль миграции ртути во взвешенном веществе.

В устьевой области р. Красная обнаружена достоверная положительная корреляционная связь между концентрациями взвешенной ртути в поверхностном и придонном слое воды и температурой воды ($r = 0,644$ и $0,542$), концентрацией железа ($r = 0,85$ и $0,805$) и $C_{орг}$ ($r = 0,863$ и $0,824$). На пресноводных участках р. Красная и ее протоках зависимость концентрации растворенной (Hg_p) и взвешенной форм (Hg_v) была отрицательной ($r = -0,89$), а

в устьях реки, протоках и зонах взморья – положительной ($r = 0,94$ и $r = 0,67$ соответственно).

4.3 Распределение ртути в донных отложениях

Содержание ртути в различных горизонтах донных отложений отмечено в среднем на уровне $0,9 \pm 0,18$ мкг/г с.м. Распределение ртути и ее соединений в донных отложениях представлено на рисунках 5 и 6.

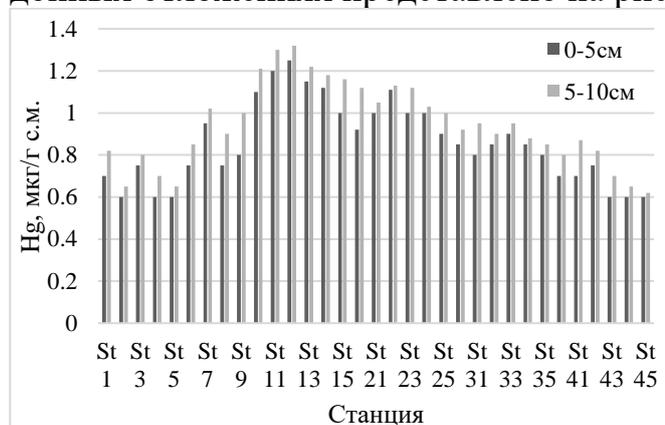


Рисунок 5 – Концентрации ртути в различных горизонтах ДО устьевой области р. Красная

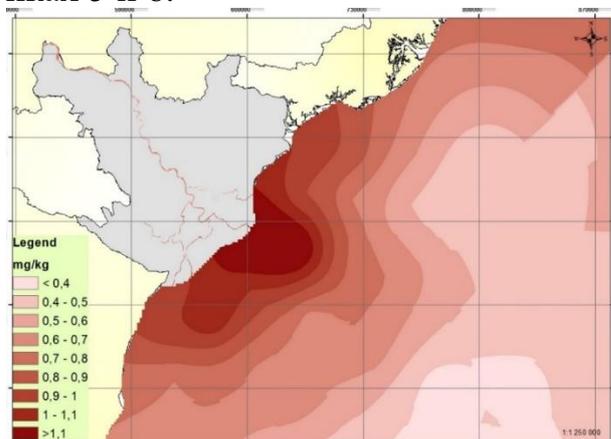


Рисунок 6 – Пространственное распределение ртути в ДО устьевой области р. Красная

Содержание ртути в ДО водотоков превышает ПДК для ДО пресноводных объектов рыбохозяйственного назначения в 1,68 раза. На вершине дельты р. Красная, на протоках Чали, Дай и Нинг Ко содержание ртути в ДО приближалось к минимальным значениям ($0,11 \pm 0,01$ мкг/г см) и варьировало в узком интервале. Ниже по течению значение ртути в ДО несколько возрастает и достигает максимума в устье: участок Балат $0,95 \pm 0,03$ мкг/г с.м. на горизонте 0–5 см и $1,02 \pm 0,01$ мкг/г с.м. на горизонте 5–10 см; в устье протоков Чали, Нинг Ко и Дай – от 0,75 до 1 мкг/г с.м. Высокое содержание ртути в устьях водотоков может свидетельствовать об активной сорбции ртути на взвешенных веществах и далее осаждении ртути до и в зоне смешения речных и морских вод.

Содержание ртути в ДО взморья составила в среднем $0,94 \pm 0,37$ мкг/г с.м., что превышало Вьетнамский норматив для ДО солоноватых и морских акваторий в 1,34 раза. На расстоянии 25–30 км от берега наблюдались самые высокие значения содержания валовой ртути ($1,18 \pm 0,14$ мкг/г с.м.), превышающие Вьетнамский норматив в 1,7 раза. За маргинальным фильтром содержание валовой ртути постепенно снижается до минимальных значений (0,6 мкг/г с.м.).

Следует отметить особенность распределения ртути по различным горизонтам ДО: содержание ртути в горизонте 5–10 см выше, чем в верхнем горизонте ДО. Градиент повышения концентрации ртути по глубине ДО в среднем составил 0,016 мкг/см. Увеличение концентрации ртути по глубине ДО является объективным свидетельством благоприятных условий к накоплению ртути в ДО устьевой области р. Красная.

Содержание ртути в ДО коррелировало (положительно и достоверно) с концентрациями железа ($r = 0,711$), содержанием органических веществ ($r = 0,553$), с содержанием ртути во взвешенном веществе в придонном слое воды ($r = 0,66$). Следует отметить, что при высоком содержании взвешенной ртути в воде повышается процесс адсорбции ртути донными отложениями, а значит повышается и ее содержание в ДО, а при низком содержании ртути в воде происходит освобождение ее из донных отложений в толщу воды путем десорбции.

Регрессионные уравнения, которые характеризуют форму связи между концентрациями ртути и различными показателями водной среды представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Регрессионные уравнения, характеризующие связи между концентрациями ртути и параметрами водной среды

Переменные	Регрессионное уравнение	R ²
Hg _{pp} , pH, S (соленость), COD (ХПК), концентрация Fe	$Hg_{pp} = - 0,009 + 0,005 \times pH - 0,001 \times S + 0,002 \times COD + 0,009 \times Fe$	0,886
Hg _{pp} , S (соленость), COD (ХПК), концентрация Fe	$Hg_{pp} = - 0,024 - 0,001 \times S + 0,002 \times COD + 0,009 \times Fe$	0,884
Hg _{вв} , T (температура воды), концентрация Fe, C (концентрация органических веществ в ВВ)	$Hg_{вв} = - 0,441 + 0,021 \times T + 0,091 \times Fe + 0,124 \times C$	0,844
Hg _{вв} , T (температура воды), концентрация Fe, C (концентрация ВВ)	$Hg_{вв} = - 1,42 + 0,065 \times T + 0,152 \times Fe - 0,001 \times ВВ$	0,786
Hg в ДО, S (соленость), концентрация Fe, C (концентрация органических веществ в ВВ)	$Hg_{ДО} = 0,146 + 0,013 \times S + 0,251 \times Fe - 0,015 \times C$	0,912
Hg в ДО, S (соленость), концентрация Fe, Hg _{pp} , Hg _{вв}	$Hg_{ДО} = 0,165 + 0,012 \times S + 0,249 \times Fe - 0,327 \times Hg_{pp} - 0,018 \times Hg_{вв}$	0,911

Коэффициенты детерминации $R^2 > 0,7$, полученные уравнения регрессии статистически значимы и могут быть успешно использованы на практике в целях прогнозирования концентрации ртути в устьевой области р. Красная.

ГЛАВА 5 СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ГИДРОБИОНТАХ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ

5.1 Содержание ртути в различных тканях рыб

Результат дисперсии свидетельствует о том, что значения содержания ртути в различных тканях и органах исследуемых рыб статистически различаются (рисунок 7). Распределение ртути в различных тканях и органах рыб в устьевой области р. Красная можно представить в следующем порядке:

мышцы > печень > почки > жабры > кишечник > кости.

В устьевой области р. Красная вариации содержания ртути между разными тканями и органами исследуемых рыб были небольшие, а в мышечной ткани обнаружены наибольшие уровни аккумуляции ртути по сравнению с другими тканями и органами рыб, в том числе с печенью. Это свидетельствует о том, что в устьевой области р. Красная отмечалось загрязнение ртутью, но на низком уровне, и на длительном промежутке времени не была отмечена

высокая вариация концентрации ртути в водной среде. Мышечные ткани медленнее освобождаются от ртути, т. е. они накапливают токсикант в большей концентрации.

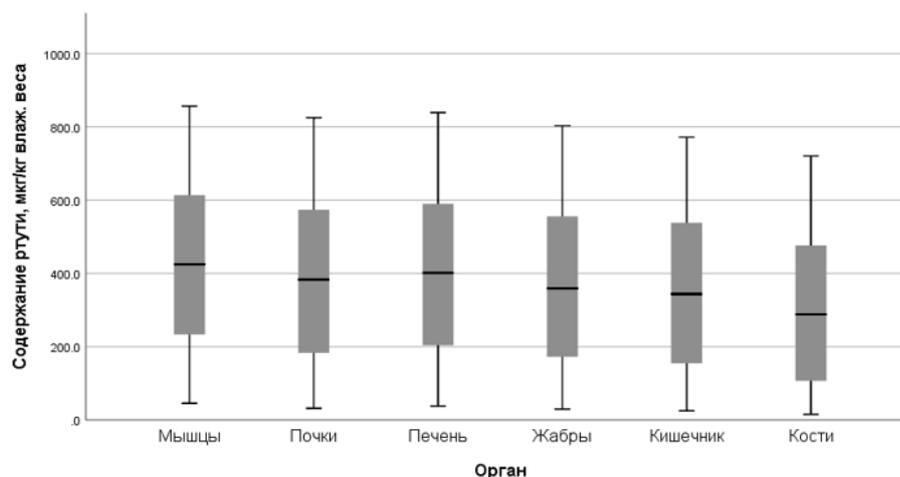


Рисунок 7 – Вариация содержания ртути в разных органах рыб в устьевой области р. Красная

Кроме того, соотношение содержания ртути в печени и мышцах рыб ($C_{Hg_печень} / C_{Hg_мышцы}$) было использовано в качестве чувствительного биотеста ртутного загрязнения водных экосистем устьевой области р. Красная (рисунок 8).

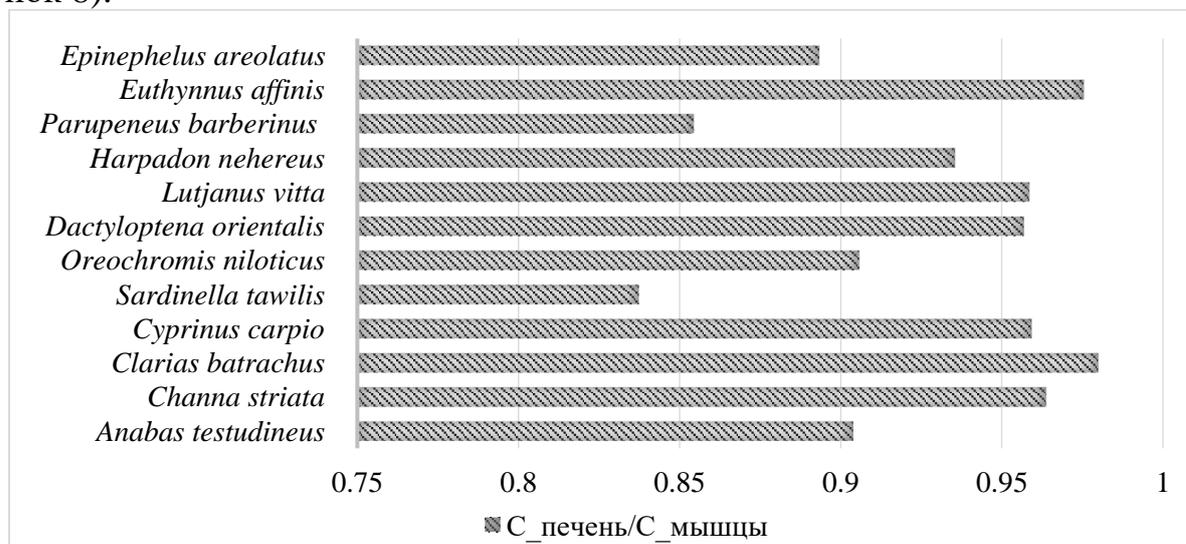


Рисунок 8 – Соотношение содержания ртути в печени и мышцах различных видов рыб в устьевой области р. Красная

Из рисунка 8 видно, что все соотношения содержания ртути в печени и мышцах исследуемых видов рыб меньше 1, т. е. в устьевой области р. Красная отсутствует ртутное загрязнение ихтиофауны, и в водной среде не была выявлена большая временная вариация концентрации ртути. Концентрация ртути, обнаруженная в воде устьевой области р. Красная, не вызывала острого летального действия у всех пресноводных и морских видов рыб. Не отмечены достоверные изменения выживаемости, роста или размножения, а также морфологической характеристики исследуемых видов рыб в период исследования.

Содержания ртути в мышечной ткани 6 пресноводных и 6 морских видов рыб, выловленных в акватории устьевого устьевой области р. Красная, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание ртути в мышечной ткани рыб в устьевой области реки Красная

Вид	n	Масса, г	Длина, см	Hg, мкг/кг
Пресноводные рыбы				
Анабас <i>Anabas testudineus</i>	35	35,05±0,74	18,18±0,82	179,90±12,22
Змееголовов <i>Channa striata</i>	72	115,11±0,42	21,54±0,24	577,69±11,51
Пресноводный сом <i>Clarias batrachus</i>	71	142,11±0,65	22,28±0,45	856,54±9,09
Сазан <i>Cyprinus carpio</i>	25	573,01±24,46	42,26±0,99	480,13±11,34
Пресноводная сельдь <i>Sardinella tawilis</i>	75	21,58±0,68	10,40±0,59	45,51±3,28
Нильская тиляпия <i>Oreochromis niloticus</i>	72	108,32±1,44	15,78±0,56	155,56±8,10
Морские рыбы				
Восточная летучка <i>Dactyloptena orientalis</i>	25	512,37±21,75	38,03±1,45	551,97±8,09
Красно – коричневый окунь <i>Lutjanus vitta</i>	30	355,19±17,87	21,60±0,59	649,84±36,94
Индоокеанский бомбиль <i>Harpadon nehereus</i>	22	202,83±7,72	32,89±0,48	366,48±8,74
Темнополосая зубатая барабуля <i>Parupeneus barberinus</i>	35	38,27±1,17	12,08±0,57	287,23±11,53
Восточный тунец <i>Euthynnus affinis</i>	22	1551,06±59,23	68,06±7,32	886,35±53,22
Жёлто-белый групер <i>Epinephelus areolatus</i>	24	464,16±22,94	20,24±1,68	369,57±27,13

Из таблицы 2 видно, что максимальные значения средних содержаний ртути (856,54 ± 9,09 мкг/кг) наблюдались у пресноводного сома (*Clarias batrachus*), минимальные (45,51 ± 3,28 мкг/кг) – у пресноводной сельди (*Sardinella tawilis*). Концентрации ртути в мышечной ткани пресноводного сома (*Clarias batrachus*) и змееголова (*Channa striata*) превышают Вьетнамские санитарно-гигиенические нормы по содержанию ртути в пищевых продуктах (в 1,7 и 1,2 раза соответственно).

Максимальные значения токсиканта в мышечной ткани морских рыб наблюдались в восточном тунце *Euthynnus affinis* (886,35 ± 53,22 мкг/кг); минимальные – в планктофаге (темнополосая зубатая барабуля *Parupeneus barberinus*) (287,23 ± 11,53 мкг/кг). Превышение Вьетнамских санитарно-гигиенических норм по содержанию ртути в пищевых продуктах наблюдались в восточном тунце (*Euthynnus affinis*), красно-коричневом окуне (*Lutjanus vitta*) и в восточной летучке *Dactyloptena orientalis* (в 1,8; 1,3 и 1,1 раза соответственно). У большинства видов морских рыб содержание ртути в мышечной ткани больше, чем у пресноводных рыб. Это явление объясняется процессом осморегуляции морских рыб и увеличением содержания ртути в пище рыб (фитопланктоне, зоопланктоне и микроорганизмах) из-за повышенного содержания растворенной и взвешенной форм ртути в воде маргинального фильтра.

Следует отметить, что содержание ртути в мышечной ткани рыб зависит от морфологических параметров, а именно от массы тела рыб (r от 0,508 до

0,911), т. е. уровень накопления ртути в мышечной ткани увеличивается при повышении массы тела.

Помимо межвидовых отличий в накоплении гидрополлютанта, у всех исследованных видов рыб из устьевой области р. Красная отмечено внутривидовое отличие для особей, выловленных в среднем и нижнем течениях реки. Содержание ртути в мышечной ткани рыб у 5 видов (*Anabas testudineus*, *Sardinella tawilis*, *Clarias batrachus*, *Oreochromis niloticus* и *Cyprinus carpio*), выловленных в нижнем течении реки, больше, чем у этих же видов, но выловленных в среднем течении р. Красная, в 1,26; 1,22; 1,15; 1,05 и 1,05 раза соответственно. Данный факт связан с повышением массы и длины тела ихтиофауны в нижней части реки. Кроме того, в нижней части и устье реки содержание ртути в пищевых объектах рыб (мелкие и крупные беспозвоночные, мелкие рыбы) также увеличивается с увеличением концентрации ртути в воде и донных отложениях.

Группирование исследованных видов рыб из р. Красная по трофологическому признаку важно для описания зависимости накопления ртути в мышечной ткани от питания рыб (рисунок 9).

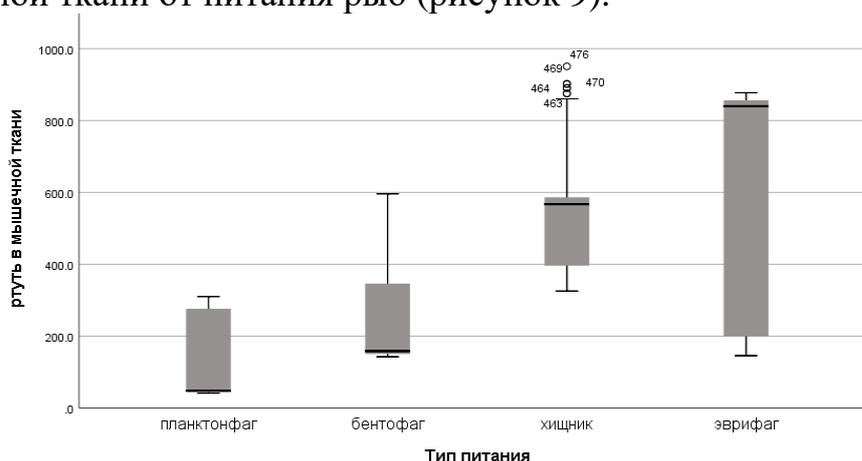


Рисунок 9 – Содержание ртути в мышечной ткани рыб с разным типом питания

По мере увеличения положения вида рыб в трофической цепи происходило достоверное повышение содержания ртути в их мышечной ткани. В устьевой области р. Красная пресноводная сельдь (*Sardinella tawilis*) имеет наименьшую концентрацию ртути в мышцах. Это объясняется тем, что пресноводная сельдь в экосистеме является планктофагом с небольшой продолжительностью жизни. Хищное питание способствует более интенсивному накоплению ртути, т. к. пища хищников (мелкие рыбы, беспозвоночные) содержит больше ртути, чем планктон и водные растения. Хищники (*Channa striata*, *Monopterus albus*, *Lutjanus vitta*, *Lutjanus vitta*, *Euthynnus affinis*, *Harpadon nehereus*, *Epinephelus areolatus*) содержат в 4–13 раз большее количество ртути в мышечной ткани по сравнению с мирными видами рыб. Наибольшие вариации содержания ртути в мышечной ткани отмечаются у эврифагов по сравнению с рыбами другого типа питания из-за разнообразия видов их пищи.

К абиотическим факторам, способствующим аккумуляции ртути в тканях рыб, относятся гидрохимические параметры воды и концентрация ртути в воде и в донных отложениях. Содержание ртути в мышечной ткани пресноводных видов рыб, обитающих в устьевой области р. Красная, проявляло положительную и достоверную корреляцию с концентрацией растворенной ртути в воде (r от 0,584 до 0,942), т. е. для таких видов рыб уровень накопления ртути в мышечной ткани увеличивается при повышении концентрации растворенной ртути в воде. Для морских рыб содержание ртути в мышечной ткани имеет достоверную и положительную корреляционную зависимость от концентрации и растворенной, и взвешенной ртути. Это объясняется увеличением взвешенной ртути в воде и в пище рыб из-за процессов адсорбции ртути на взорье, особенно в зоне маргинального фильтра.

5.2 Содержание ртути в тканях двустворчатых моллюсков

В устьевой области р. Красная максимальные значения средних концентраций ртути ($416,6 \pm 1,2$ мкг/кг) отмечены у *Austriella corrugata*, минимальные ($30,5 \pm 1,2$ мкг/кг) – у *Lutraria rhynchaena*. Во всех тканях двустворчатых моллюсков не наблюдалось превышения Вьетнамских санитарно-гигиенических норм по содержанию ртути в пищевых продуктах (0,5 мг/кг сырой массы).

Результаты дисперсионного анализа ANOVA содержания ртути (при HSD test ($\alpha = 0,05$)) в некоторых тканях и органах 4 видов моллюсков показали различное накопление ее по видам (рисунок 10) и по тканям (рисунок 11).

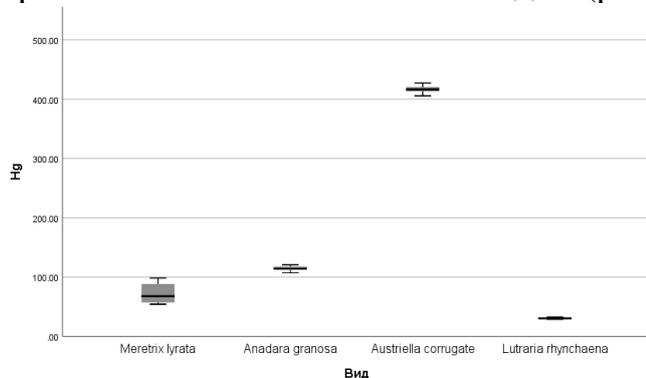


Рисунок 10 – Содержание ртути в моллюсках по разным видам

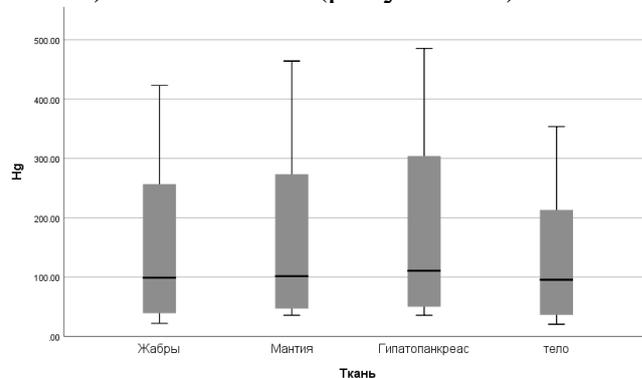


Рисунок 11 – Содержание ртути в моллюсках по различным тканям (Б)

Среднее содержание ртути в разных видах двустворчатых моллюсков статистически различается ($p < 0,05$) и представляет следующий ряд:

$$Austriella\ corrugata > Anadara\ granosa > Meretrix\ lyrata > Lutraria\ rhynchaena.$$

Вариация содержания ртути в тканях моллюсков связана со способностью ее биологического накопления и с различием в экологических характеристиках, в частности средой обитания. *Meretrix lyrata* и *Anadara granosa* являются типичными представителями солоноватой воды, обитают преимущественно в прибрежной зоне на песчаном грунте под влиянием отливно-приливной деятельности, *Austriella corrugata* относят главным образом к обитателям

стоячих водоемов с заиленным дном, *Lutraria rhynchaena* живут в акватории приглубой зоны взморья [Le Xuan Sinh, 2013]. Кроме того, в природном водоеме, где преобладают медленные течения и обильное количество ила в донных отложениях, отмечается высокое содержание ртути по сравнению с песчаными донными осадками и формируются условия, благоприятные для циркуляции природных соединений ртути.

Выявлен порядок распределения ртути в различных тканях моллюсков в устьевой области р. Красная: гепатопанкреас > мантия > жабры > тело (нога).

Разница в накоплении ртути в органах и тканях моллюсков объясняется отличиями в аккумулирующей способности и уровне метаболической активности органов и тканей [Лукашев, 2009]. Жабры являются органами дыхания и центрами фильтрации и имеют повышенное содержание ртути по сравнению с ее содержанием в теле. Следовательно, именно депонированием липидов в гепатопанкреасе объясняется максимальное содержание ртути в указанном органе. «Нога» и мантия моллюсков выполняют механическую и защитную функции. Так, по составу они имеют преимущественно фибриллярные белки с малым количеством реакционных центров и липидов. В связи с этим содержание ртути в таких тканях представлено в наименьшем количестве по сравнению с другими исследуемыми тканями.

Наибольшее значение коэффициентов биологического накопления K_a для всех видов моллюсков отмечено для гепатопанкреаса, наименьшее – для ноги: $K_{a(г-п)} > K_{a(м)} > K_{a(ж)} > K_{a(нога)}$. Самую высокую степень бионакопления ртути (взвешенной и в ДО) имеет *Austriella corrugata* ($K_a = 472,08$; $K_d = 2,42$), а самую низкую – *Lutraria rhynchaena* ($K_a = 34,68$; $K_d = 0,18$).

Выявлена достоверная тесная положительная связь между содержанием ртути и массой, длиной тела у трех (*Meretrix lyrata*, *Austriella corrugata* и *Lutraria rhynchaena*) из 4 видов моллюсков, обитающих в устьевой области р. Красная (r от 0,82 до 0,96).

Установлены тесные достоверные положительные зависимости концентрации ртути в тканях моллюсков от ее взвешенной формы в придонном слое воды и в донных отложениях (r от 0,68 до 0,92), т. е. при увеличении содержания ртути в придонном слое воды и донных отложениях ее содержание в тканях моллюсков также увеличивается.

Уравнения регрессии, характеризующие формы связи между концентрациями ртути в тканях моллюсков и ее концентрациями во взвешенной форме и в ДО, имеют вид

$$y = -58,221 + 0,41 \times m + 29,676 \times CHg_s + 0,954 \times K_s;$$

$$y = -21,319 - 0,105 \times m + 28,174 \times CHg_b + 172,992 \times K_b,$$

где y – концентрация ртути в тканях моллюсков;

m – масса тела моллюсков;

CHg_s – концентрация взвешенной ртути в придонном слое воды;

K_s – коэффициент накопления взвешенной ртути;

CHg_b – концентрация ртути в поверхностном горизонте ДО;

K_b – коэффициент накопления ртути в ДО.

Следует отметить, что два полученных уравнения регрессии могут быть успешно использованы на практике в целях прогнозирования концентрации ртути в тканях двустворчатых моллюсков в устьевой области р. Красная.

5.3 Биоаккумуляция ртути в трофической цепи устьевой области реки Красная

В зоне маргинального фильтра, в пресноводной и морской экосистемах устьевой области р. Красная имеются аналогичные пищевые цепи:

- 1) вода – фитопланктон – зоопланктон – рыбы-хищники;
- 2) вода – фитопланктон – зоопланктон – молодь рыб – рыбы-хищники;
- 3) донные отложения – зообентос – рыбы-хищники.

На рисунках 12–14 показаны процессы биоаккумуляции ртути в пищевых цепях в гидроэкосистемах устьевой области р. Красная.

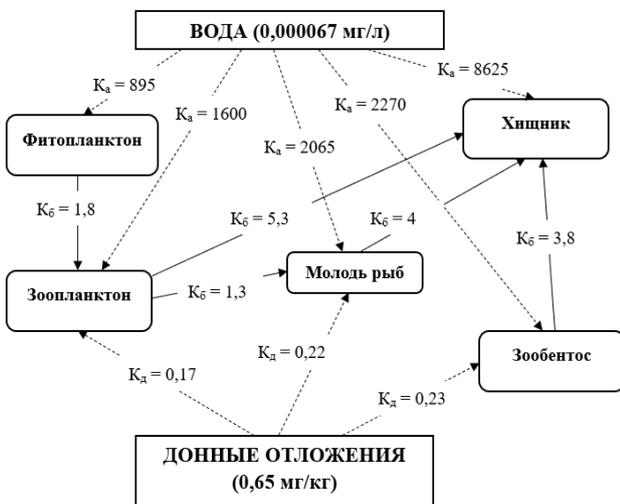


Рисунок 12 – Бионакопление и биомагнификация ртути в пищевых цепях в пресноводной экосистеме

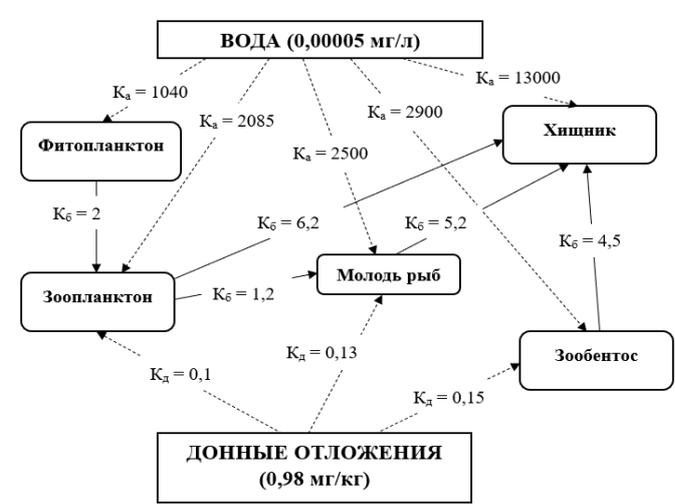


Рисунок 13 – Бионакопление и биомагнификация ртути в пищевых цепях в экосистеме зоны маргинального фильтра

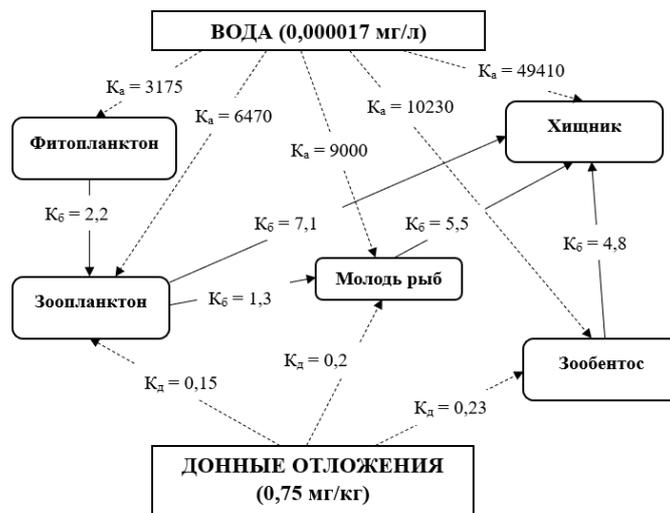


Рисунок 14 – Бионакопление и биомагнификация ртути в пищевых цепях в морской экосистеме

В звеньях пищевой цепи морской экосистемы и зоны маргинального фильтра коэффициенты бионакопления ртути также были заметно выше, чем в пресноводной: в фитопланктоне – в 1,2 и 3,5 раза, в зоопланктоне – в 1,3–4 раза, в молоди рыб – в 1,2–4,4 раза, в хищниках – в 1,5–5,7 раза. Это свидетельствует о прямой зависимости степени биологического накопления ртути гидробионтами от солености. Коэффициент бионакопления ртути в бентосе по отношению к донным отложениям во всех экосистемах устьевой области р. Красная был значительно ниже единицы. Низкие значения коэффициента бионакопления ртути из донных отложений в гидробионтах, вероятнее всего, говорят о том, что неорганические и органические формы ртути в донных отложениях, в том числе сульфидных, в меньшей степени аккумулируются живыми организмами в сравнении с метилртутью в воде.

Коэффициенты биомагнификации на всех трофических уровнях во всех экосистемах устьевой области р. Красная были в пределах 1,2–7,1, что указывает на увеличение накопления ртути на последующем трофическом уровне в 1,2–7,1 раза. Ртуть способна аккумулироваться гидробионтами не только из воды, донных отложений, но и в значительной степени алиментарным путем.

ВЫВОДЫ

1. Выявлены превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения в устьевой области р. Красная по следующим показателям: по меди и цинку – 2 ПДК, по нитратам – 2,3 ПДК, по ХПК – 2,4 ПДК, по фосфатам – 3 ПДК, по мышьяку – 4 ПДК, по железу – 10 ПДК. Вода характеризуется нейтральной и слабощелочной средой, высокой концентрацией растворенного кислорода (5,5–11,2 мг/л) и взвешенного вещества (45 – 113 мг/л).

2. Установлено, что концентрация растворенной ртути в воде устьевой области р. Красная превышает 4 ПДК. Максимальная концентрация растворенной ртути отмечается в районе города Вьетчи (вершине дельты) и снижается по течению водотоков. Концентрация взвешенной ртути возрастает по направлению к морю и достигает максимума в устье водотоков (0,6–1,25 мкг/л). Концентрация общей ртути в воде в период летнего половодья больше в 1,7–2 раза, чем в зимней межени. В донных отложениях выявлены превышения ПДК по ртути в 1,68 раза для водотоков и в 1,34 раза для взморья. Наибольшая концентрация ртути в ДО наблюдается в зоне 25–30 км от берега, за границами зоны маргинального фильтра. Повышение содержания ртути в ДО происходит в конце зимней межени.

3. Показано, что в системе «вода – ДО» устьевой области р. Красная ртуть мигрирует между тремя основными формами: растворенной – взвешенной – ДО; каждая миграционная форма доминирует в отдельной зоне: растворенная ртуть – на вершине дельты, взвешенная ртуть – в устьях водотоков и зоне маргинального фильтра, а ртуть в ДО – на взморье, за границами зоны маргинального фильтра.

4. Выявлено влияние зоны маргинального фильтра на перераспределение миграционных форм ртути: 70 % растворенной и до 90 % взвешенной ртути

удерживаются в зоне маргинального фильтра. Это объясняется адсорбцией неорганических и органических растворенных форм ртути на взвешенных веществах и дальнейшим осаждением ртути в донных осадках.

5. Содержание ртути в различных тканях и органах рыб представлено в следующем порядке: мышцы > печень > почки > жабры > кишечник > кости; в двусторчатых моллюсках: гепатопанкреас > мантия > жабры > тело (нога). Коэффициенты бионакопления ртути гидробионтами в зоне маргинального фильтра и морской экосистеме были заметно выше (в 1,2–5,7 раза), чем в пресноводной. Накопление ртути гидробионтами возрастает с повышением трофического уровня и достигает максимумов в хищных видах рыб. Коэффициенты биомагнификации (1,2–7,1) прогнозируют увеличение накопления ртути на последующем трофическом уровне в 1,2–7,1 раза.

6. Установлено, что концентрация растворенной ртути в воде имеет положительные корреляции с температурой воды, ХПК, БПК₅, концентрацией железа ($r = 0,671; 0,795; 0,558; 0,732$ соответственно) и отрицательную корреляционную связь с соленостью воды ($r = -0,864$). Концентрация взвешенной ртути имеет положительные корреляции с температурой воды, концентрацией железа, содержанием ВВ и $C_{орг}$ ($r = 0,644; 0,85; 0,533; 0,863$). Содержание ртути в поверхностном горизонте донных отложений положительно и достоверно коррелировало с концентрацией железа, $C_{орг}$ и с содержанием взвешенной ртути в придонном слое воды ($r = 0,711; 0,553$ и $0,66$). Накопление ртути в мышечной ткани морских рыб положительно зависит как от концентрации взвешенной ртути в воде (r от 0,523 до 0,752), так и от растворенной (r от 0,584 до 0,942). А концентрации ртути в мышечной ткани пресноводных рыб имеют положительные корреляционные зависимости только от концентрации растворенной ртути в воде. Выявлены прямые корреляционные связи между содержанием ртути в тканях моллюсков и концентрацией ее взвешенной формы в придонном слое воды и в донных отложениях (r от 0,68 до 0,92).

Практические рекомендации

Полученные результаты возможно использовать для разработки сети системного экологического мониторинга и районирования загрязнения ртутью в устьевой области р. Красная:

- карты распределения миграционных форм ртути могут быть применены для дальнейшего районирования загрязнения ртутью в устьевой области р. Красная;

- модели регрессии рекомендуется использовать для оценки определения миграционных форм ртути в различных компонентах экосистемы устьевой области р. Красная и прогнозирования уровня загрязнения водной среды ртутью в любой момент наблюдения, в конкретной экологической ситуации и, как следствие, уменьшать негативные последствия, сокращать экономические затраты и время;

- схемы распределения ртути в пищевых цепях можно использовать при оценке уровня бионакопления и биомагнификации ртути в разных водных

экосистемах устьевой области р. Красная и определять возможности применения каждого вида гидробионтов в качестве биоиндикаторов ртути;

При использовании гидробионтов в пищевых целях рекомендуется: беременным женщинам и детям не использовать некоторые виды местной ихтио- и малакофауны (пресноводный сом, восточный тунец, змееголов, красно-коричневый окунь и восточная летучка, моллюски *Austriella corrugata*); а взрослым людям использовать в количестве не более 300–450 г данных рыб в неделю и 600 г моллюсков в неделю.

Перспективы дальнейшего разработки темы

Дальнейшая перспектива и углубление исследований возможны в нескольких направлениях:

- совершенствование районирования загрязнения ртутью в устьевой области р. Красная;
- совершенствование моделей, описывающих процессы распределения ртути в экосистемах, а также пути использования этих моделей для прогнозирования уровня ртути в воде – донных отложениях – рыбах – моллюсках из исходных концентраций ртути в воде и гидролого-гидрохимических параметров среды в аквальных комплексах Вьетнама.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, включенных в международные базы данных

1. Нгуен, Н.Т.Т. Пространственное распределение тяжелых металлов (Pb, Hg, As) в устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Вестник Мурманского государственного технического университета. Сер.: Биологические науки. – 2018. – Т.21. – №2. – С.213 – 220

2. **Nguyen, N.T.T** Mercury content in Bivalves at the estuary area of the Red river (Vietnam) / N T T Nguyen, I V Volkova // Journal of Agriculture and Environment. – 2021. – Vol. 17. – №1. – Текст: электронный – URL: <https://doi.org/10.23649/jae.2021.1.17.1>

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

3. Нгуен, Н.Т.Т. Содержание ртути в мышечной ткани рыб в устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Естественные и технические науки: Изд-во «Спутник+». – 2023. – №9. – С.38 – 43.

4. Нгуен, Н.Т.Т. Моделирование миграции ртути в воде устьевой области реки Красная (Вьетнам)/ Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Проблемы региональной экологии: Изд-во «Камертон». – 2023. – №6. – С.63 – 67.

5. Нгуен, Н.Т.Т. Characteristics of mercury bioaccumulation by fish in the estuary area of the Red River/ Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Экология урбанизированных территорий: Изд-во «Камертон». – 2023. – №4. – С.10 – 15.

6. Нгуен, Н.Т.Т. Особенности распределения тяжелых металлов во взвешенном веществе в устьевой взморье реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Естественные и технические науки: Изд-во «Спутник+». – 2017. – № 11. – С.30 – 33.

7. **Нгуен, Н.Т.Т.** Сравнительный анализ возможности применения методов расчета интегрального показателя качества воды для оценки воды в устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 2. – Текст: электронный – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=26236>

8. **Нгуен, Н.Т.Т.** К вопросу о накоплении тяжелых металлов (Pb, Hg, As) в компонентах водных экосистем устьевой области реки Красная (Хонгха) (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2018. – №1. – С.132 – 140.

9. **Нгуен, Н.Т.Т.** Особенности миграции ртути в воде и донных отложениях устьевой области реки Красная во Вьетнаме / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова, В.И. Егорова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2019. – Т.26. – №4. – С.431 – 440.

10. **Нгуен, Н.Т.Т.** Аккумуляция ртути в двустворчатых моллюсках в гидроэкосистеме устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2023. – №1. – С.82 – 88.

Другие публикации по теме диссертации

11. **Nguyen, N.T.T.** Mathematical modelling for distribution of heavy metals in estuary area of Red River (Vietnam) / N.T.T Nguyen, I.V Volkova // Journal of Physics: Conference Series – United Kingdom. – 2018. – Vol. 1015. – Текст: электронный – URL: <https://doi:10.1088/1742-6596/1015/3/032100>

12. **Nguyen, N.T.T.** Assessment of heavy metal pollution in water and sediments in the red river delta (Vietnam) / N.T.T Nguyen, I.V Volkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 451. – Текст: электронный – URL: <https://doi:10.1088/1757-899X/451/1/012203>

13. **Nguyen, N.T.T.** Risks assessment of water pollution at estuary area of red river (Vietnam) / N.T.T Nguyen, I.V Volkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 451. – Текст: электронный – URL: <https://doi:10.1088/1757-899X/451/1/012204>

14. **Nguyen, N.T.T.** Distribution of Mercury in Water and Bottom Sediments of the Estuary Area of the Red River (Vietnam) / N.T.T Nguyen, I.V Volkova, V.I Egorova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 224. – Текст: электронный – URL: <https://doi:10.1088/1755-1315/224/1/012047>

15. **Nguyen, N.T.T.** Geochemical processes of Mercury transformation in the river-sea system / N.T.T Nguyen, I.V Volkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 315. – Текст: электронный – URL: <https://doi:10.1088/1755-1315/315/1/052039>

16. **Волкова, И.В.** Интегральная оценка уровня загрязнения воды в устьевой области реки Красная (Вьетнам)/ И.В Волкова, Н.Т.Т. Нгуен // Научный журнал «United-Journal» – 2017. – №4. – С. 4 – 8.

17. **Нгуен, Н.Т.Т.** Гидрохимическая характеристика устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Материалы международной научной конференции научно-педагогических работников Астраханского государственного технического университета (61 НПП). – Текст: электронный – Астрахань: издательство АГТУ. – 2017.

18. **Нгуен, Н.Т.Т.** Особенности накопления тяжелых металлов в системе – вода – донные отложения – моллюски в устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции «Наука и практика – 2017». – Текст: электронный – Астрахань: издательство АГТУ. – 2017.

19. **Нгуен, Н.Т.Т.** Применение интегральной оценки качества воды в устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, И.В Волкова // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли» – Владивосток. – 2017. – С.89 – 93.

20. **Нгуен, Н.Т.Т.** Накопления некоторых тяжелых металлов (Pb, Hg, As) в донных отложениях устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен, В.Т. Чьонг, И.В Волкова // Материалы национальной научно-практической конференции «Наука, образование и инновации в современном мире» – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». – 2018. – С.128 – 134.

21. **Нгуен, Н.Т.Т.** Оценка загрязнения ртутью в донных отложениях в устьевой области реки Красная (Вьетнам) / Н.Т.Т. Нгуен// Природопользование и устойчивое развитие регионов России: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции – Пенза: РИО ПГАУ. –2020. – С.193 – 197.