

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук, доцент,
Волкова Ирина Владимировна

Астрахань – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	13
1.1 Состояние загрязненности водных экосистем ртутью	13
1.1.1 Физико-химические свойства и формы ртути в природной водной среде	13
1.1.2 Источники поступления ртути в водную среду	14
1.1.3 Механизмы миграции и трансформации ртути в водных экосистемах	16
1.1.4 Особенности аккумуляции ртути в трофических сетях	21
1.1.5 Токсичность ртути для гидробионтов	22
1.2 Устьевая область рек и процесс миграции металлов	25
1.3 Устьевая область реки Красная	26
1.3.1 Географическая и геологическая характеристика	26
1.3.2 Климатические условия	27
1.3.3 Гидрологическая и гидродинамическая характеристика	28
1.3.4 Почвенный покров	28
1.3.5 Флора и фауна	29
1.3.6 Антропогенная нагрузка на устьевую область реки Красная	31
1.4 История исследования распределения и трансформации тяжелых металлов в устьевой области реки Красная	32
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.1 Методы отбора проб	35
2.2 Методы анализа	39
2.3 Методика обработки данных	41
ГЛАВА 3 ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ	44
3.1 Гидролого-гидрохимическая оценка воды	44
3.2 Распределение взвешенного вещества	46

3.3 Распределение органического углерода во взвешенных веществах и донных отложениях	48
ГЛАВА 4 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РТУТИ В ВОДЕ – ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ.....	52
4.1 Распределение растворенной ртути в воде	52
4.1.1 Содержание растворенной ртути в воде.....	52
4.1.2 Исследование взаимозависимости концентрации растворенной ртути и различных гидрохимических параметров воды.....	55
4.2 Распределение взвешенной формы ртути в воде	59
4.2.1 Пространственное распределение взвешенной формы ртути.....	59
4.2.2 Распределение ртути по формам миграции в воде.....	61
4.2.3 Исследование взаимосвязи концентрации взвешенной формы ртути с различными параметрами воды.....	62
4.3 Распределение ртути в донных отложениях	68
4.3.1 Содержание ртути в различных горизонтах донных отложений	68
4.3.2 Пространственное распределение ртути в донных отложениях устьевой области реки Красная	71
4.3.3 Взаимосвязь между содержанием ртути в донных отложениях и различными параметрами водной среды.....	73
ГЛАВА 5 СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ГИДРОБИОНТАХ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ.....	78
5.1 Содержание ртути в различных тканях рыб	78
5.2 Содержание ртути в тканях двустворчатых моллюсков	89
5.3 Биоаккумуляция ртути в трофической цепи устьевой области реки Красная.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
ВЫВОДЫ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	129

ПРИЛОЖЕНИЕ А Сведения о гидрохимической оценке воды устьевой области реки Красная	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Сведения о содержании ртути в гидробионтах в устьевой области реки Красная	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Ртуть является высокотоксичным элементом первого уровня опасности. Особенности характеристики ртути являются разнообразие форм существования и способность миграции и трансформации в различных компонентах окружающей среды [Lindberg, 2007; Лобус, 2011]. Формы существования ртути и ее нахождения определяют токсическое действие на биологические организмы и человека [Mason, 1996; Barwick, 2003].

В окружающей среде источники ртути могут быть как природными, так и антропогенными [Будников, 1998; Дымникова, 2012; Аксенов, 2015]. Самыми мощными источниками поступления данного поллютанта в окружающую среду Вьетнама считаются сжигание и размещение отходов, очистка сточных вод. Согласно исследованию ЮНЕП в 2014 г., в условиях Вьетнама количество ртути, поступающей из антропогенных источников в атмосферу, составило 59,5 % от общей антропогенной эмиссии, от отходов – 11,6 %, в почву и в водную среду – 10 %.

Река Красная является наиболее длинной рекой, протекающей на территории севера Вьетнама. Она состоит из двух частей: дельты (14,6 тыс. км²) и устьевого взморья (1300 км²) [Исупова, 2011; Павлов, 2014]. Водные ресурсы реки Красная и ее притоков на протяжении десятилетий играют важную роль в обеспечении водопотребления населения и экономики севера Вьетнама [Кы, 2004]. В устьевой области реки Красная существуют как местные источники ртути, включая промышленные предприятия, сжигание и размещение отходов, сточные воды (из крупнейших водно-транспортных, промышленных центров и населенных пунктов на базе городов Ханой, Вьетчи, Хайфон), так и региональные и глобальные эмиссии ртути (из Европы, Америки и Северной Азии) [Li, 2010]. В настоящее время ртутное загрязнение является актуальной проблемой устьевой области реки Красная.

В устьевой области реки Красная ртуть и ее соединения накапливаются частично в дельте, и их избыток вместе с водой попадает в устьевое взморье. В водной экосистеме ртуть может присутствовать в воде в различных формах (растворенной, коллоидной, в комплексах с гидратированными катионами и др.), а также может сорбироваться во взвешенных веществах, осаждаться в донных отложениях (ДО) и аккумулироваться гидробионтами [Линник, 2002]. Из-за способности к аккумуляции ртути донные отложения могут служить источником вторичного загрязнения ртутью в водной экосистеме [Воробьев, 2007], поэтому при оценке миграции ртути в водной среде устьевой области р. Красная важно не только рассматривать содержание ртути и ее соединений в отдельных компонентах, но и делать это во взаимосвязи с другими компонентами водной среды и с другими средами в целом. Получение новых научных данных о биогеохимических особенностях и закономерностях миграции и трансформации ртути в системе «вода – донные отложения – гидробионты» в устьевой области реки Красная необходимо при определении уровня загрязнения ртутью и оценке экологического состояния 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 реки Бак Данг [Сао, 2009; Nguyen, 2014] и в ДО различных рек и водохранилищ Вьетнама [Dao, 1998; Le, 1998], а также в двустворчатых моллюсках в устьевых областях реки Бак Данг (Северный Вьетнам) [Le Xuan Sinh, 2018; Чьонг Ван Туан, 2019]. Содержания ртути в воде, ДО 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 дает региональную оценку масштаба загрязнения ртутью, а также пространственное распределение данного гидрополлютанта из Северной и Восточной Азии.

Измерения ртути в воде, донных отложениях (ДО) и ткани 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, приводят к неточности прогнозирования содержания ртути в окружающей среде.

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

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

Основные 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 взаимозависимости 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).

Основные 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.

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 по специальности 1.5.15. Экология (Биологические науки); 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.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.б.н., профессору кафедры Гидробиологии и общей экологии, заместителю директора Института рыбного хозяйства, биологии и природопользования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» Волковой И.В. за неоценимую помощь на всех этапах работы, совместное обсуждение, ценные замечания и советы, а также за терпение и понимание. Искренняя благодарность д.с.-х.н, профессору, заведующему кафедры Гидробиологии и общей экологии ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» Зайцеву В.Ф. за помощь и советы при обсуждении диссертации. Автор глубоко признательна к.б.н, заместителю руководителя Волжско-Каспийского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ») Шипулину С.В. и д.б.н, профессору кафедры Гидробиологии и общей экологии ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» Котельниковой С.В. за советы на этапе статистической обработки данных. Благодарю специалистов Центра экологии и водостроительства, руководство Лаборатории института Экологии Вьетнамского морского университета за помощь на этапах отбора и анализа проб. Автор также выражает благодарность всем сотрудникам, аспирантам кафедры Гидробиологии и общей экологии ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», а также института Экологии Вьетнамского морского университета, своим родным и близким.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Состояние загрязненности водных экосистем ртутью

1.1.1 Физико-химические свойства и формы ртути в природной водной среде

Ртуть, как кадмий и цинк, относится к группе непереходных металлов. Физико-химические свойства ртути зависят от строения внешней электронной оболочки ее атома (формула $4f^{14}5d^{10}6s^2$). Степень окисления ртути равна +2 (в большинстве) и +1 [Глинка, 2003]. Среди металлов подгруппы цинка ртуть характеризуется наименьшей активностью, что обусловлено высокими значениями потенциала ионизации и положительного окислительного потенциала ее атомов [Линник, 2006].

Согласно Е. Г. Расуна [2002], основными формами существования ртути в природной среде являются элементарная (Hg^0), химически активная ($Hg(II)$), сорбированная ртуть и металлоорганические соединения. В водной среде можно выделить несколько форм существования ртути: растворенную, взвешенную форму и ртуть в донных отложениях.

В водной среде существует разнообразие растворенных форм ртути, такие как элементарная ртуть (Hg^0), комплексные соединения с различными неорганическими и органическими лигандами и органические формы ртути, главным образом метиловая ртуть и диметиловая ртуть [Линник, 2010; Нгуен, 2019]. В пресной и морской водной среде элементарная ртуть составляет от 10 до 30 % от общего количества растворенной ртути [Mason, 1993; Fitzgerald, 1995]. Hg^0 имеет относительно химически инертные, стабильные свойства в мягких окислительных или восстановительных условиях, высокую летучесть. В поверхностных водах элементарная ртуть образуется главным образом в результате процессов восстановления соединений $Hg(II)$ водными микроорганизмами [Mason, 1994], абиотического восстановления гуминовыми

веществами [Miller, 2003], разложения органических форм ртути [Fitzgerald, 1993], а также она входит в состав антропогенных выбросов, особенно хлорщелочной промышленности. При нормальных температурах происходит улетучивание элементарной ртути из водной среды в атмосферу, что играет важную роль в глобальном ртутном цикле [Mason, 1994; Fitzgerald, 1995]. В водном растворе катион Hg^{2+} метилируется в бактериально-опосредованных процессах и поглощается бактериями [Сюзанна, 2001]. В пресноводной среде наиболее стабильной формой метиловой ртути является метилртутный гидроксид CH_3HgOH , тогда как в морской воде – хлорид CH_3HgCl [Morel, 1998; Craig, 2003].

К взвешенным формам относится главным образом комплексообразование ртути с гуминовым веществом. Взвешенные формы ртути также зависят от окислительно-восстановительных условий и pH и присутствия сульфидных лигандов в водной среде.

В донных отложениях ртуть распределяется в минеральной (остаточной), карбонатной, железо-марганцевых и органических фракциях. Сульфид ртути (HgS) является основным нерастворимым минеральным соединением ртути в водных системах. Такое соединение ртути в донных отложениях преимущественно образуется при кислотной среде и низких концентрациях метана. В работе М. У. Сюзанна [2001] установлено, что присутствие органического вещества также повышает растворимость сульфида ртути из донных отложений и может привести к значительному выходу ртути в водные массы.

1.1.2 Источники поступления ртути в водную среду

В настоящее время существуют две основные группы источников поступления ртути в водную среду: природные и антропогенные.

По масштабу природные источники поступления ртути подразделяют на глобальные, региональные и локальные.

К основным глобальным природным источникам ртути относятся верхняя мантия Земли и Мировой океан. Ртуть попадает в водную среду в результате вулканической (25 000–125 000 т ртути в год), гео- и гидротермальной активности.

Региональные источники ртути – крупные ртутные и ртутьсодержащие месторождения. В земной коре основные ртутные месторождения наблюдаются в Тихоокеанском, Средиземноморском и Центрально-Азиатском ртутных поясах [Лапердина, 2000]. Локальные концентрации ртути в природных водах, расположенных вблизи залежей ртутной руды, могут достигать 80 мкг/л [Ртуть: распространение, опасности..., 2016]. В настоящее время существует около 30 основных ртутьсодержащих минералов, большинство из них содержит киноварь – сульфид ртути HgS , – которую используют как основное сырье при производстве ртути.

Антропогенными источниками ртути являются сжигание ископаемого топлива, выбросы промышленных предприятий и сжигание отходов. Сжигаемое топливо (уголь, нефть и природный газ) содержит природную ртуть, т. е. при его использовании и сжигании в стационарных печах на электростанции и в других производствах происходит значительный выброс ртути и ее соединений в атмосферу и гидросферу. В работе китайских исследователей [Li-Qiang, 2011] утверждается, что до 45 % антропогенного загрязнения ртутью составляет сжигание органического топлива.

Основными антропогенными источниками эмиссий ртути в окружающую среду являются предприятия цветной металлургии, особенно производящие переработанные металлы (производство «вторичных» металлов), предприятия химической и электротехнической промышленности, предприятия, добывающие и перерабатывающие руды различных металлов, производящие цемент, флюс для металлургии, где ртуть является попутным компонентом. Ртуть также широко применяется в других отраслях промышленности, сельском хозяйстве, военном деле, медицине и стоматологии [Лапердина, 2000].

По оценке ЮНЕП [2016], глобальные антропогенные выбросы ртути в 2015 г. составили 1,93 тыс. т/год. В условиях Вьетнама общая антропогенная эмиссия ртути в окружающую среду составила 49,13 т/год, в том числе количество ртути, поступающей из антропогенных источников в атмосферу, составило 59,5 % от общей антропогенной эмиссии, из отходов – 11,6 %, в почву – 10 % и в водную среду – 10,9 %. Крупнейшие выбросы ртути в атмосферу приходятся на долю сжигания топлива (уголь, нефть, природный газ и биомасса). Эта величина в 2014 г. составила 13,3 % от общей антропогенной эмиссии. Сжигание биотоплива не считается мощным источником.

Ртуть широко используется в промышленности Вьетнама, особенно в производстве цемента (15,82 % от общей антропогенной эмиссии). При сжигании отходов основной вклад в поступление ртути в окружающую среду оказывают сжигание и утилизация коммунально-бытовых, опасных, медицинских отходов и нелегальное сжигание отходов. Ежегодно в результате сжигания отходов, главным образом коммунально-бытовых, опасных и медицинских, в окружающую среду суммарно поступает до 12,4 т ртути.

Самыми мощными источниками поступления ртути в окружающую среду Вьетнама считаются размещение отходов и очистка сточных вод. По данным 2014г. [UNEP, 2016], при размещении отходов в окружающую среду поступает до 17,18 т ртути в год, из которых 98,6 % не учитываются. Годовое количество ртути, поступающей из системы очистки сточных вод, составило более 17,6 т (35,85 % от общей антропогенной эмиссии).

1.1.3 Механизмы миграции и трансформации ртути в водных экосистемах

Ртуть, поступившая в водную среду из природных и антропогенных источников, немедленно вовлекается в цепь разнообразных миграций и трансформаций под влиянием многочисленных факторов среды. На рисунке 1

приведена миграция ртути, поступающей со стоками в водную экосистему (Рисунок 1).

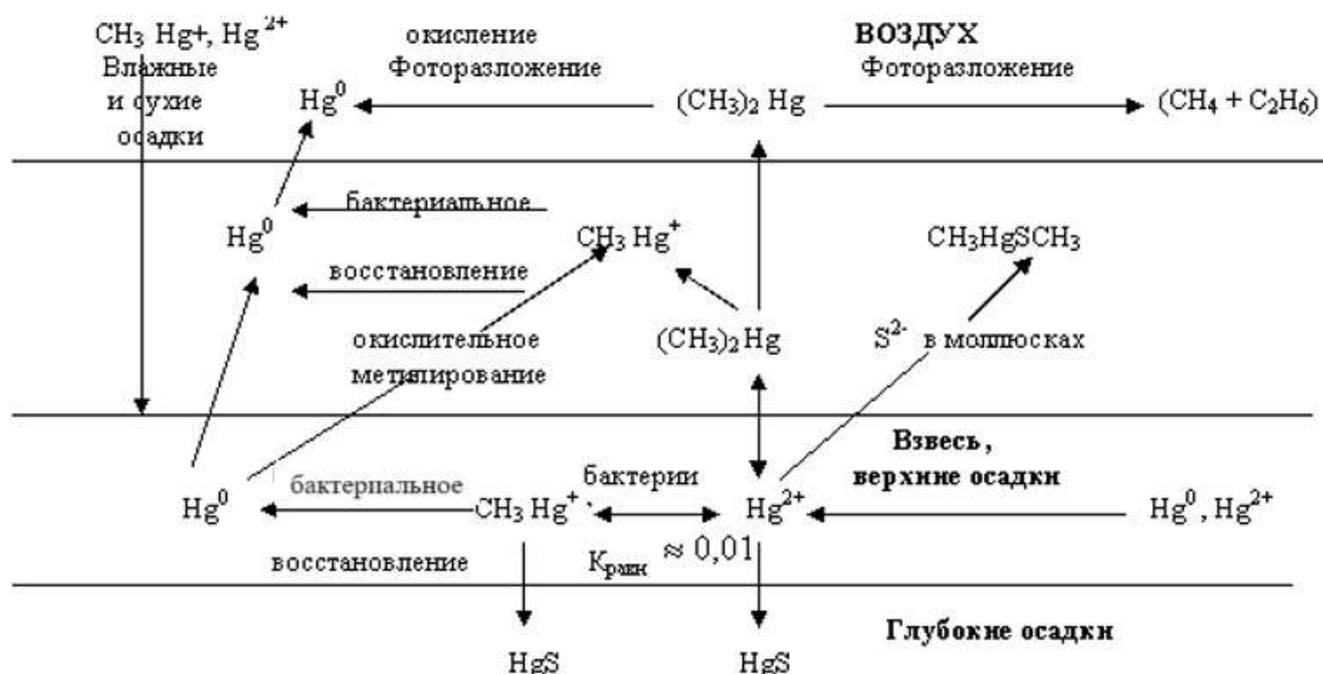


Рисунок 1 – Биогеохимический цикл ртути [Лобанова, 2009].

В водной экосистеме протекают следующие процессы миграции и трансформации ртути [Давыдова, 2004; Линник, 2010]:

- физические (механическое перемешивание, улетучивание, фотолиз, разбавление, адсорбция и десорбция, осаждение);
- химические (диссоциации, гидролиз, реакции ионных обменов, окислительно-восстановительные реакции, комплексообразование);
- геологические (накопление в донных отложениях и породообразование);
- биологические (аккумуляция живыми организмами, разрушение и превращение с участием ферментов и метаболитов).

- *Физические процессы: адсорбция и десорбция ртути*

В водной среде ртуть имеет тенденцию к сорбированию, поэтому большая часть растворимой ртути связана с взвешенными частицами [Masson, 1993]. В своих исследованиях N. M. Lawson с соавторами [2001] и С. М. Ульрих [2005] предположили, что Hg^{2+} должна весьма активно адсорбироваться на взвешенных частицах и в донных отложениях водоемов, поскольку характеризуется высокой

электроотрицательностью. Перенос ртути и ее соединений взвешенными веществами более важен в пресных и солоноватых водах акваторий, особенно важен в устьевой области и на взморье, – более, чем в открытом море [Langston, 1985].

Процессы адсорбции и десорбции ртути зависят от разнообразия факторов в водных экосистемах (рН, содержание органических веществ, концентрации оксидов железа и марганца).

рН водной среды влияет на процессы адсорбции/десорбции ртути. Кислотная среда приводит к интенсификации процессов десорбции ртути и освобождения их в толщу воды, т. е. концентрация растворенной ртути в воде повышается. При увеличении рН среды до определенной величины повышается возможность адсорбции растворенной ртути на поверхности взвешенного вещества (ВВ) и – далее – осаждения данных соединений в донных отложениях (ДО). При дальнейшем увеличении рН среды концентрация растворимой ртути вновь возрастает за счет процессов комплексообразования [Давыдова, 2004].

Содержание ртути в донных отложениях и взвешенных веществах тесно связано с содержанием органического вещества [Lawson, 2001; Lutter, 2002; Давыдова, 2004]. Наиболее интенсивная адсорбция ртути отмечена в донных отложениях с содержанием 1–10 %-го органического вещества [Линник, 2010]. Поглощение ртути (П) донными отложениями в значительной степени зависит от концентрации ионов Cl^- . В исследовании N. M. Lawson с соавторами [2001] подтверждено, что с ростом концентрации ионов Cl^- адсорбция неорганических соединений ртути уменьшается.

Содержание оксидов железа и марганца особенно влияет на процессы адсорбции/десорбции ртути в водных системах. Это объясняется большой площадью их поверхности и хорошей способностью адсорбировать и осажать Hg, а также повторно высвобождать ее после их растворения. Особенно в бескислородных условиях гидроксиды железа и марганца являются единственной причиной быстрого повышения концентрации ртути и метиловой ртути в воде, т. к. они растворяются и высвобождают ртуть. М. У. Сюзанна [2001] отмечал, что

гидроксиды железа и марганца образуют подвижные комплексы с органическим веществом и глинистыми минералами, которые могут далее адсорбироваться взвешенными веществами и осаждаться в донных отложениях, т. е. использование гидроксидов, возможно, увеличивает способность очистки воды от ртути.

Перемешивание пресных и морских вод в зоне маргинального фильтра устьевой области реки играет важную роль в удалении неорганических и органических соединений ртути из воды, главным образом в результате коагуляции. Есть прямые доказательства их сорбции на глинах и гидроокислах железа. Образованные таким образом взвешенные частицы могут внести значительный вклад в органический материал, аккумулирующийся в эстуариях [Лисицын, 2002].

Донные отложения могут выступать как приемник и как вторичный источник ртути. Взаимозависимости между процессами адсорбции/десорбции и реакциями осаждения/высвобождения в границе водной толщи и донных отложений определяют концентрацию ртути и ее соединений в водной среде [Сюзанна, 2001]. В работе А. В. Гавриленко [2010] отмечено, что факторы, влияющие на эффективность связывания ртути в донных отложениях, располагаются в следующем порядке: содержание гуминовых веществ > размеры частиц > ионообменная способность катионов > площадь поверхности частиц [Петросян, 2007; Гавриленко, 2010].

- *Химические процессы: гидролиз и процессы комплексообразования ртути*

Гидролиз является важным химическим процессом, определяющим формы существования ртути в воде. В природной воде с значением рН, равным 6,5–8,5, многие неорганические соли ртути (нитраты, сульфаты, перхлораты) очень сильно гидролизуются, в результате чего образуются нерастворимые гидроксиды [Давыдова, 2004].

В водной среде процессы комплексообразования играют наиболее важную роль в трансформации ртути. Эти процессы приводят к связыванию ионов ртути с лигандами в растворимые соединения и удерживанию их в толще воды [Линник, 2010]. В этих комплексах лиганды могут быть органическими и неорганическими.

Наиболее устойчивыми являются комплексы ртути с неорганическими лигандами, содержащими атомы галогенов, азота, углерода, фосфора, серы [Голованова, 2015]. Органические лиганды (ароматические и аминокислоты) встречаются в составе растворимых органических веществ природного происхождения (фульвокислоты) и в промышленных стоках (уксусная, карбоновая, глутаминовая, салициловая кислота и т. п.) [Мур, 1987].

Особенно большую роль в процессах комплексообразования играют гумусовые вещества, главным образом фульвокислоты. Как было показано Г. М. Варшал [1999], в присутствии фульвокислот растворимость водного оксида ртути возрастает примерно в 20 раз.

- *Процессы метилирования ртути в водной среде*

Метилирование неорганической ртути в водах и в донных отложениях является ключевым процессом в миграции и трансформации ртути в водных экосистемах. Процесс метилирования становится максимальным на окислительно-восстановительной границе, которая может изменяться посезонно и часто совпадает с границей раздела донных отложений и воды и уменьшается с увеличением глубины отложений [Langston, 1985; Lutter, 2002; Ульрих, 2005].

Метилирование ртути осуществляется при присутствии подходящей молекулы метил-донора. В природной водной среде отмечается большое разнообразие молекул – потенциальных доноров, которые синтезируются как биологически, так и абиотически. В зависимости от механизма они разделяются на биометилирование, абиотическое и смешанное метилирование [Lawson, 2001].

- Биометилирование

Биометилирование неорганической ртути разделяют на энзиматическое и неэнзиматическое. Энзиматическое биометилирование требует присутствия активно метаболизирующих организмов, а неэнзиматическое биометилирование требует только присутствия метилированных продуктов активного метаболизма [Waldron, 2000]. В исследованиях В. С. Петросяна [2003] показано, что процесс биометилирования происходит оптимально при обогащении кислорода, температуре 35 °С и рН 6,5. Кроме молекулярного метилирования ртути

клеточное поглощение ртути играет ключевую роль в процессе метилирования на клеточном уровне микроорганизмов в водных экосистемах [Петросян, 2003].

– Абиотическое метилирование

Химическое метилирование ртути требует присутствия подходящего донора метиловой группы. В природных водных экосистемах представлены многие возможные метилирующие агенты, такие как органосилоксаны, кремний-связанные вещества, фотохимически индуцированное алкилирование хлорида ртути с метанолом, этанолом, уксусной кислотой и пропионовой кислотой [Waldron, 2000]. Гумусовое вещество является значительным метилирующим агентом в водной среде [Варшал, 1999].

1.1.4 Особенности аккумуляции ртути в трофических сетях

Соединения ртути, особенно метилртуть, эффективно поглощаются гидробионтами. Для исследования накопления ртути организмами используются коэффициенты бионакопления, представляющие собой простое соотношение между концентрацией ртути в организме и ее содержанием в среде, воздействию которой подвергается этот организм [Lutter, 2002]. В исследованиях многих авторов были описаны коэффициенты бионакопления ртути порядка 10^4 – 10^7 [Stein, 1996]. т. к. накопление ртути в пищевой цепи водных организмов может быть высоким при очень низких ее концентрациях в водной среде.

В работе А. П. Лисицына [2002] отмечается, что химический элементный состав гидробионтов океанической пелагиали «повторяет» состав морской воды, а следовательно, и коры выветривания. Живые организмы трансформируют окружающую среду, что участвуют биогеохимические циклы миграции веществ в океане [Лисицын, 2012].

Накопление химических элементов гидробионтами разных трофических уровней зависит не только от концентраций таких элементов в окружающей среде, но и от форм их нахождения, определяющих биологической активностью и доступностью для гидробионтов [Guentzel, 1994].

Пресноводная биота способна накапливать определенные количества ртути из природных источников. Большинство гидробионтов содержат в своих тканях ртуть. По результатам исследования Р. J. Craig [2002], И. Л. Головановой [2015], отмечено, что в тканях незагрязненных морских рыб и ракообразных концентрация ртути варьирует от 0,01 до 1,5 мкг/г и от 0,14 до 0,75 мкг/г соответственно, а в тканях рыб из незагрязненных пресных водоемов – от 0,2 до 1 мкг/г.

Во многих работах была выявлена связь между значением рН и содержанием ртути в гидробионтах. При низком значении рН бионакопление ртути гидробионтами происходит интенсивнее [Гремячих, 2010; Алёхина, 2012; Sheehan, 2014; Голованова, 2015], однако при постоянном количестве ртути, поступающей в экосистему, и низком значении рН водоемов снижение суммарной биомассы гидробионтов способствует более высокому накоплению гидрополлютанта в конечных звеньях пищевых цепей [Голованова, 2015].

В водной экосистеме трофическая структура определяет эффективность передачи ртути от фитопланктона до крупных хищников [Kim, 2012]. В каждом звене пищевой цепи ртуть способна накапливаться до уровня, вызывающего отрицательные биологические последствия [Obrist, 2009].

1.1.5 Токсичность ртути для гидробионтов

При исследовании воздействий органических соединений ртути (метил-, бутил- и пропилртутьхлориды) и неорганических соединений ртути (хлориды ртути) на красную водоросль *Plumaria elegans*, Woney A.D [1971] настаивал на том, что органические соединения ртути оказались более токсичными, чем неорганические, при этом бутилртуть оказывала более выраженный эффект угнетения на рост водоросли по сравнению с другими органическими соединениями ртути. Норкин Р. и Кайн J.M. [1978] отмечали, что значение минимальной действующей токсической дозы ртути для культуры спорофитов водорослей составляло 0,05 мг/л.

Концентрация 0,05–20 мг/л ртути в воде приводила к старению и снижению развития макрофитов вследствие снижения содержания хлорофилла, РНК, белка, активности катализа и протеазы, повышения содержания свободных аминокислот. Ртуть неблагоприятно влияет на процесс фотосинтеза, т. к. снижает выделение кислорода на 50–90 %. Токсическое действие соединений ртути на организмы макрофитов было неодинаковым для разных тканей. Наиболее чувствительными к действию ртути оказались апикальные клетки [Czuba, 1982; De, 1985].

Токсичность ртути в отношении водных беспозвоночных зависит от концентрации и форм ртути, стадии развития организмов, а также от гидролого-гидрохимических показателей водной среды (температуры, солености, рН, скорости течения воды и т. д.). Метилртуть более токсична, чем неорганические соединения ртути. Личиночная стадия является наиболее чувствительной к действию ртути. На этой стадии у многих видов водных беспозвоночных обычно выявляется острая токсичность к концентрациям ртути, составляющим 1–10 мкг/л. В работе Dorn P. [1974] отмечалось достоверное учащение дыхания двустворчатых моллюсков при концентрации ртути от 0,001 мг/л. Stromgern T. [1982] утверждал, что при концентрации ртути 0,3 мкг/л у мидий *Mytilus edulis* снижалась скорость роста. При содержании ртути 1,6 мкг/л рост данного вида почти полностью прекращался через 3–4 дня воздействия, а острое летальное действие ртути в течение 24 ч было отмечено при концентрации ртути 25 мкг/л.

При небольшой концентрации ртути наблюдалось нарушение репродуктивной функции зоопланктона. У водяной блохи влияние метилртути на размножение наблюдалось при концентрации 0,04 мкг/л, а влияние на выживаемость при 0,2–0,98 мкг/л [Biesinger, 1972].

При исследовании воздействия сульфата ртути на зеленого краба *Carcinus maenas* M. H. Depledgen [1984] подтверждал, что данное соединение ртути в количестве 0,05 мг/л повышало двигательную активность и увеличивало среднюю частоту сердечных сокращений с 32,1 до 44,7 ударов/мин, а при количестве 1 мг/л сердечная деятельность и потребление кислорода снижались, и все животные погибали через 24–48 ч из-за потерь способности к осморегуляции.

Schindler J.E. [1977] отмечал, что концентрация ртути 0,03 мг/л является порогом токсического действия для различных видов рыб. Значение LC₅₀ (96 ч) для пресноводных рыб варьировались от 33 до 400 мкг ртути/л

Биологическая активность и токсичность ртути различаются в зависимости от ее различных миграционных форм [Berlin, 2007; Dietz, 2013]. По сравнению с органическими соединениями ртути, неорганические соединения менее токсичны. Неорганические соединения ртути в большинстве существуют в формах относительно стабильных, нерастворенных и слабо абсорбируются. Поэтому в случае попадания в организм рыб они не проникают и повреждают слизистую желудочно-кишечного тракта и почки [Бондарева, 2003; Berlin, 2007]. Растворимые органические соединения ртути, особенно метилртуть, более токсичны для рыб, учитывая их высокую мобильность в организме. Метилртуть из водной среды способна проникать в организм через кожу, жабры, через клеточную мембрану, интенсивно абсорбироваться в кишечнике, переноситься с кровью во все органы и ткани организма [Berlin, 2007]. В организме рыб метилртуть существует виде комплекса с цистеином, сходным с метионином [Simmons-Willis, 2002]. В клетке содержание ртути можно представить в следующем порядке: цитозоль > ядро > митохондриальная фракция > микросомальная фракция > лизосомы [Немова, 2014]. На молекулярном уровне повреждающее действие метилртути проявляется необратимыми конформационными изменениями макромолекул (белков и нуклеиновых кислот), инактивацией ферментных систем, снижением скорости метаболических процессов, нарушением свойств клеточных мембран и повреждением генетического аппарата [Степанова, 1997]. При увеличении содержания ртути в тканях рыб повышается уровень общих липидов, но снижаются количество холестерина и доля полиненасыщенных жирных кислот [Богдан, 2002], что в результате приводит к нарушению транспортных свойств и проницаемости клеточной мембраны.

1.2 Устьевая область рек и процесс миграции металлов

По данным А. П. Лисицына [1994], распределение взвеси в Мировом океане показывает, что воды устьев крупных рек характеризуются максимальными концентрациями взвешенного вещества и максимальными скоростями осаждения осадочного материала. В устье р. Амазонки осаждается более 95 % терригенного осадочного материала на узком участке с соленостью 0–3 ‰ [Nevado et al., 2010], в устье р. Миссисипи – более 90 %. По закону Стокса с замедлением течения вод в устьевой области наиболее интенсивное осаждение наблюдается для частиц крупнее 5–10 мкм [Mauro et al., 2002].

Существует процесс, приводящий к быстрому выделению осаждения, – коагуляция. В общем определении коагуляцией называют процесс укрупнения частиц в дисперсных системах с жидкой или газообразной дисперсной средой. Частицы с размерностью менее 2 мкм, составляющие 50–70 % взвешенного речного материала, удаляются из толщи воды в результате коагуляции в устьевой области реки [Кукина, 2009].

Одним из наиболее важных химических процессов трансформации элементов в водах устьевой области является флокуляция, которая преобразовывает органические и неорганические растворенные вещества во взвешенные частицы при увеличении ионной силы и рН воды. Результаты экспериментального исследования С. Е. Кукиной [2002] показывают, что существует два механизма флокуляции: нейтрализация заряда частиц и образование мостиков, соединяющих частицы [Кукина, 2002]. А. П. Лисицын [1994] установил, что процесс образования флоккул начинается на начальных стадиях смешения вод и достигает максимума при 15–20 ‰, при этом формируются коллоиды терригенных гуминовых кислот, фульвокислот и гидроокисного железа или железистые пенки на взвешенных частицах, которые, будучи эффективными химическими адсорбентами, выводят из речных вод микроэлементы [Скибинский, 2005].

Узкий пояс, где происходит смешение речных и морских вод, А. П. Лисицын [1994] назвал «маргинальным фильтром океана». В условиях маргинального фильтра происходят значительные по масштабам процессы флокуляции и коагуляции растворенных (коллоидных) и взвешенных веществ. Наибольшее значение для процессов трансформации металлов в поясе маргинального фильтра имеют три компонента сорбционной системы: глинистые минералы, железо, органический углерод, меньшее значение имеют марганец и алюминий [Лисицын, 2012].

Помимо гидрохимических и геологических процессов, в маргинальном фильтре происходят еще биоассимиляция и биофильтрация. Все эти процессы приводят к тому, что 93–95 % элементов во взвешенной форме выпадают в донные отложения и 20–40 % растворенных веществ речного стока (включая загрязнения) уходят из воды [Гордеев, 2014].

Таким образом, процессам коагуляции, флокуляции, механической дифференциации, седиментации, биоассимиляции и биофильтрации речного материала принадлежит ведущая роль в миграции большинства элементов в устьевой области.

1.3 Устьевая область реки Красная

1.3.1 Географическая и геологическая характеристика

Река Красная имеет наибольшую длину по сравнению с другими реками, протекающими во Вьетнаме. Ее общая длина составляет 1183 км, а протяженность на территории Вьетнама – 510 км [Le, 2007]. Уклон реки довольно велик – 29,9 % [Mai, 2009].

Анализ геологической характеристики показал, что устьевая область р. Красная относится к эстуарно-дельтовому типу. Она делится на 4 части: устьевой приливной участок р. Красная (части ее нижнего течения), обширную дельту,

небольшие эстуарии на устьях р. Красная и ее рукавах (Чали, Дай, Нинь Ко) и открытое приглубое приливное устьевое взморье [Исупова, 2011].

Вершина устьевой области р. Красная находится в 210 км от моря, около г. Вьетчи, и немного ниже устья притоков Да (правого) и Ло (левого) [Михайлов, 2012]. Рельеф дельты р. Красная низменный и плоский.

Устьевое взморье р. Красная занимает прибрежную зону залива Бак Бо с шириной около 30 км [Кы, 2004]. Уклон дна на устье водотоков составляет около 0,2%. Морской уклон дна значительно больше, варьирует от 0,35 до 0,55 % [Михайлов, 2012].

1.3.2 Климатические условия

Устьевая область р. Красная, как и бассейн реки, расположены в субтропическом муссонном климатическом поясе с двумя четко выраженными сезонами года (летний и зимний). Летний влажный сезон длится с мая по октябрь, зимний сухой сезон – с ноября по апрель [Кы, 2004].

Среди климатических характеристик устьевой области р. Красная следует отметить высокую среднегодовую температуру, значительную атмосферную влажность, муссонную атмосферную циркуляцию и достаточно высокое среднегодовое количество осадков. Среднегодовая температура воздуха в Ханое равна 23,7 °С [Кы, 2004]. Зимой преобладает северо-восточный ветер с низкой влажностью, а летом – юго-восточный ветер с высокой влажностью. Во время летнего сезона, особенно с июня по август, наблюдается высокая вероятность тайфунов [Михайлов, 2012]. Согласно литературным источникам [Кы, 2004], в пределах дельты годовое количество осадков составляет от 1 600 до 2 000 мм. Наибольшее количество атмосферных осадков приурочено к летним месяцам, составляя 85 % от годового количества осадков. По данным В. Н. Михайлова [2012], испарение составляет более 800 мм/год с максимумами в мае–сентябре и минимумом в апреле.

1.3.3 Гидрологическая и гидродинамическая характеристика

Основные протоки речной системы р. Красная на территории устьевой области представлены главным рукавом дельты, который в нижней части носит название Балат, протоком Дай, Ванук, Чали, Нинь Ко [Tran, 2007]. В настоящее время воды р. Красная втекают в залив Бак Бо через 9 устьев: Латьхуен (5% суммарного речного стока в море), Намчьеу (10%), Киньтхай (5%), Ванук (19%), Тхайбинь (6%), Чали (9%), Балат (21%), Нинь Ко (6%) и Дай (19%) [Van Maren, 2005].

Из-за высокой влажности и большого количества осадков водный режим р. Красная характеризуется большим коэффициентом стока и повышенной водоносностью реки. По данным Н. В. Кы [2004], среднемноголетний расход воды на вершине устьевой области (г. Шонтэй) составляет 3 631 м³/с, а объем стока воды – 114,6 км³/год.

Особенностью гидродинамических характеристик р. Красная является неравномерное распределение стока воды в течение года. На период летнего половодья (июнь–октябрь) приходится более 75 % годового стока, а на зимнюю межень (ноябрь–май) – 25 % годового стока [Tran, 2007]. Высокие уровни воды в половодье являются причиной затопления большей части дельты р. Красная.

На устьевом взморье р. Красная средняя величина приливных колебаний уровня воды составляет 2,1 м, возрастая в сизигию до 4,5 м [Кы Н. В., 2004].

1.3.4 Почвенный покров

По данным Центра сельского хозяйства Вьетнама, в устьевой области р. Красная имеется 7 основных типов почв (Рисунок 2). Почвенный покров устьевой области характеризуется распространением глинистых почв, глеевых и красно-желтых ферраллитных суглинистых почв.

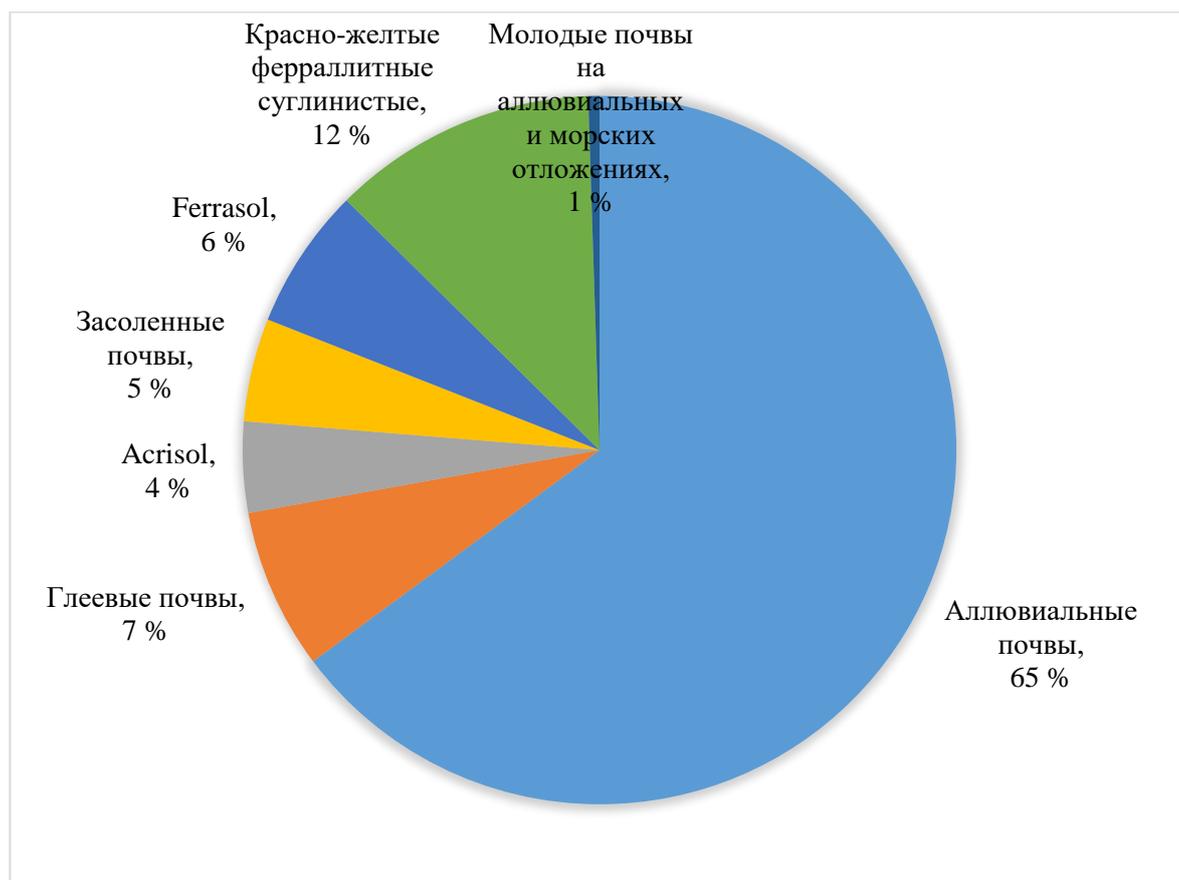


Рисунок 2 – Основные типы почв в устьевой области р. Красная

Согласно исследованиям А. Н. Кузнецова [2003], почвенный покров равнинного ландшафта Вьетнама, в том числе устьевой области р. Красная, имеет следующие основные типы почв: красно-желтые ферраллитные суглинистые, желтые почвы глинистых линз, аллювиальные, болото-аллювиальные и торфяно-глеевые почвы в целом.

В настоящее время особенностью почвообразования в устьевой области реки Красная является увеличение площади засоленных почв в результате приливных явлений, которое значительно влияет на почвенный покров наводнений и хозяйственную деятельность.

1.3.5 Флора и фауна

В устьевой области р. Красная преобладают влажные вечнозеленые тропические леса, переменнно-влажные тропические леса, тропические саванны, устьям рукавов соответствует зона мангровых лесов [Кы, 2004].

Водная растительность представлена настоящей водной и земноводной растительностью.

Настоящая водная растительность устьевой области р. Красная занимает 1,4 тыс. км². Все виды водной растительности делятся на 4 группы:

- прикрепленные растения с плавающими листьями (нимфейник щитолистный, рдест узловатый, кувшинка чисто-белая, кувшинка розовая);
- прикрепленные погруженные растения (канадская элодея, спиральная валлиснерия, пронзеннолистные, блестящие, гребенчатые рдесты и др.);
- неприкрепленные свободно плавающие на поверхности воды растения (сальвиния плавающая, водокрас обыкновенный, ряска малая, многокоренник обыкновенный);
- неприкрепленные погруженные растения (роголистник темно-зеленый, пузырчатка обыкновенная и др.).

Мангровые заросли и приливная среда в дельте р. Красная образуют водно-болотные угодья, расположенные в биосферном заповеднике Суан Туи и Тянь Хай. Площадь заповедника составляет 137 261 га. Экосистема мангровых зарослей включает мангровые леса, точнее мангровые кустарниковые заросли, и прилегающую к ним приливную зону, которая представляет собой переходную зону между морской и наземной средами. В прибрежных зонах встречается 26 видов мангровых зарослей, из которых *Sonneratia caseolaris* и *Kandelia candel* являются доминирующими видами.

Животный мир бассейна р. Красная насчитывает около 170 видов млекопитающих, 970 видов птиц, 270 видов пресмыкающихся [Кы, 2004]. Река Красная и ее притоки богаты рыбой, которая насчитывает более 1000 видов.

В устьевой области р. Красная располагаются водно-болотные угодья, являющиеся важным пунктом миграции птиц из северной Азии на юг, в индомалазийский регион и в Австралию, и обратно. Среди 78 видов водных птиц 38 видов куликов. К редким видам относят 11 видов птиц, в том числе *Calidris pugnax*, *Threskiornis melanocephalus*, *Terpsiphone atrocaudata*. Особенно важными для миграции птиц являются водно-болотные угодья Сюантхюи

площадью 120 км² и территория округа Тьенхай, которые на сегодняшний день входят в территории заповедника. Первые, расположенные южнее устья основного русла р. Красная (так еще называется устье Балат), являются важным местом зимовки водоплавающих птиц, в разные годы в них наблюдалось более 20 000 водоплавающих и 33 000 куликов. Второй, расположенный между Балат и рукавом Дай, является «зимними квартирами» *Platalea minor* [Кузнецов, 2003].

1.3.6 Антропогенная нагрузка на устьевую область реки Красная

В устьевой области р. Красная находится крупнейший водно-транспортный и промышленный узел севера Вьетнама на базе городов Ханой, Вьетчи, Хайфон. Вдоль р. Красная и некоторых дельтовых рукавов на протяжении нескольких десятков километров расположены многочисленные предприятия: металлургические, химические (целлюлозно-бумажный завод Бак Данг, заводы химических реактивов и минеральных удобрений городов Вьетчи и Ханой и т. д.), судоремонтные, судостроительные и др. Река Красная – важная транспортная артерия северной части Вьетнама. В устье протока Киньтхай находится самый крупный морской порт на севере Вьетнама – город Хайфон [Le, 2007].

Водные ресурсы р. Красная обеспечивают водопотребление населения, сельскохозяйственных и рыбохозяйственных предприятий на большей части севера Вьетнама [Исупова, 2011]. На территории устьевой области р. Красная выращивают рис, урожай которого снимают 2 раза в год, и другие сельскохозяйственные культуры (текстильные, сахаристые, масличные, стимулирующие, смоловые, плодовые, овощные). В дельте р. Красная и на части устьевого взморья провинции Тхайбинг и Намдинь занимаются рыболовством, разведением креветок в специальных водоемах, выращиванием объектов аквакультуры, добычей соли на особых площадках.

1.4 История исследования распределения и трансформации тяжелых металлов в устьевой области реки Красная

Устьевая область р. Красная является объектом исследования многих ученых. Основные задачи исследования устьевой области р. Красная во Вьетнаме – это мониторинг и прогноз наводнений и планирование сельскохозяйственного использования территории, в том числе изучение приливов и подъема уровней морской воды, водного режима дельты [Vu Duy Vinh, 2007; Steven te Slaa, 2009; Luu Thi Nguyet Minh, 2010], геоморфологических условий, русловых процессов и стока наносов [Van den Bergh, 2007; Михайлов, 2012; Vu Duy Vinh, 2013], гидрологических условий дельты для различных видов водопользования [Кы, 2004; Pruszek, 2005; Le, 2007; Luu Thi Nguyet Minh, 2010], гидрохимического состава и качества поверхностных вод и донных отложений [Le Quy An, 2005; Van den Bergh G, 2007], мониторинг и прогноз биологических ресурсов и биоразнообразия [Le Quy An, 2005; Tran Thi Kim Tinh, 2014].

Также в небольшом количестве работ (краткое изложение основных из них приведено ниже) изучены различные аспекты содержания и миграции тяжелых металлов в устьевой области р. Красная.

Cao Thi Thu Trang с соавторами [2009], изучая состав взвешенного вещества и осадков в устьевой области реки Красная и Бак Данг, установили уровни содержания и возможность накопления ряда элементов во взвешенном веществе и донных отложениях изучаемого региона. Возможность накопления соединений углерода, азота и фосфора находится в пределах 0,5–3,1 %, нефтепродуктов – 1,6–2,1 %, свинца – 14–24 %, меди – 10–14 %, цинка – 11–24 %, возможность накопления Cd, As, Hg ниже (1,8–5,8 %). Показано, что скорость накопления элементов в устьевой области реки Красная больше, чем в устьевой области реки Бак Данг, в 4 раза в половодье и 2 раза в межень, однако уровни содержания свинца и кадмия во взвешенном веществе и донных отложениях в устье реки Красная больше в 2–3,5 раза.

Nguyen Thi Bich Ngoc с соавторами [2014] исследовали уровни загрязнения некоторыми тяжелыми металлами речной воды в дельте реки Красная. Учеными установлено, что средние годовые концентрации тяжелых металлов в воде реки Красная не превышают нормативов Вьетнама, однако в период половодья наблюдается превышение нормативов в 1,5–5 раз для Fe, Cd и Pb.

Luu Duc Hai, Nguyen Chu Hoi [1995], Dao Manh Tien [1998], Le Thi Vinh [1998] установили уровни содержания и формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях различных устьевых областей Вьетнама. Показано, что на взморье с глубиной 10–40 м концентрации Cu, Zn, Hg в донных отложениях во много раз выше, чем на других участках устьевой области. В результате установлена корреляция между глинистым минералом и содержанием ртути в донных отложениях.

Le Xuan Sinh с соавторами [2013, 2014, 2018] исследовали распределение и формы нахождения ртути в водах, донных отложениях и двустворчатых моллюсках в устьевых областях рек Северного Вьетнама. Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание различных форм ртути в воде, донных отложениях и двустворчатых моллюсках не превышает нормативы Вьетнама. Авторами установлен механизм аккумуляции ртути (растворенная форма и метилртуть) в желудке и различных тканях моллюсков. Показано, что биоаккумуляция в моллюсках зависит от возраста и содержания липидов в теле моллюсков и от режима приливов/отливов (концентрация метилртути в моллюсках в районе с низким приливом больше в 1,5–1,7 раз, чем в районе с высоким приливом).

Таким образом, выявляется существенный недостаток фактического материала о распределении ртути и ее форм в различных компонентах экосистемы в устьевой области р. Красная. Имеющиеся в литературе сведения в основном относятся к 1990-м гг. и являются устаревшими с аналитической точки зрения. В литературе отсутствуют описания проведения широкомасштабных комплексных исследований устьевой области реки Красная, особенно зоны маргинального фильтра, где важно выявить степень

бионакопления и биомагнификации ртути тропическими гидробионтами и перераспределение данного металла на исследуемой акватории. В связи с этим проведение широкомасштабных комплексных исследований о распределении ртути в данной области представляется важным и актуальным в целях оценки уровней загрязнения ртутью на территории Вьетнама.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в 2016–2021 гг. в периоды основных гидрологических сезонов (летнего половодья и зимней межени).

Объектами исследования являлись вода, донные отложения (ДО), 4 вида двустворчатых моллюсков (*Meretrix lyrata*, *Anadara granosa*, *Austriella corrugate* и *Lutraria rhynchaena*), 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 тилапия (*Oreochromis niloticus*) – и 6 видов морских рыб – восточная летучка (*Dactyloptena orientalis*), красно-коричневый окунь (*Lutjanus vitta*), индоокеанский бомбиль *Harpadon nehereus*, темнопологая зубатая барабуля (*Parupeneus barberinus*), восточный тунец *Euthynnus affinis* и желто-белый групер *Epinephelus areolatus*.

Предмет исследования: миграция ртути в системе «вода – донные отложения – гидробионты» устьевой области р. Красная.

Исследование проводилось в 3 этапа: отбор проб, анализ проб в лаборатории и обработка данных.

2.1 Методы отбора проб

Для решения поставленных задач проводились полевые исследования на 37 станциях в дельте и устьевом взморье р. Красная. В течение исследования 2016–2021 гг. пробы воды отбирались 2 раза в год (в половодье и межень) по следующим станциям (Рисунок 3): р. Красная – на верхней части реки (станция 1), средней части реки (станция 2), на нижней части реки (станция 3), устье (станция 7); на каждом рукаве Чали, Нинько и Дай – 3 станции на верхней, нижней, устье; устьевое взморье – 24 станции. С каждой станции пробы вод были проведены в 3-х параллельных повторностях.

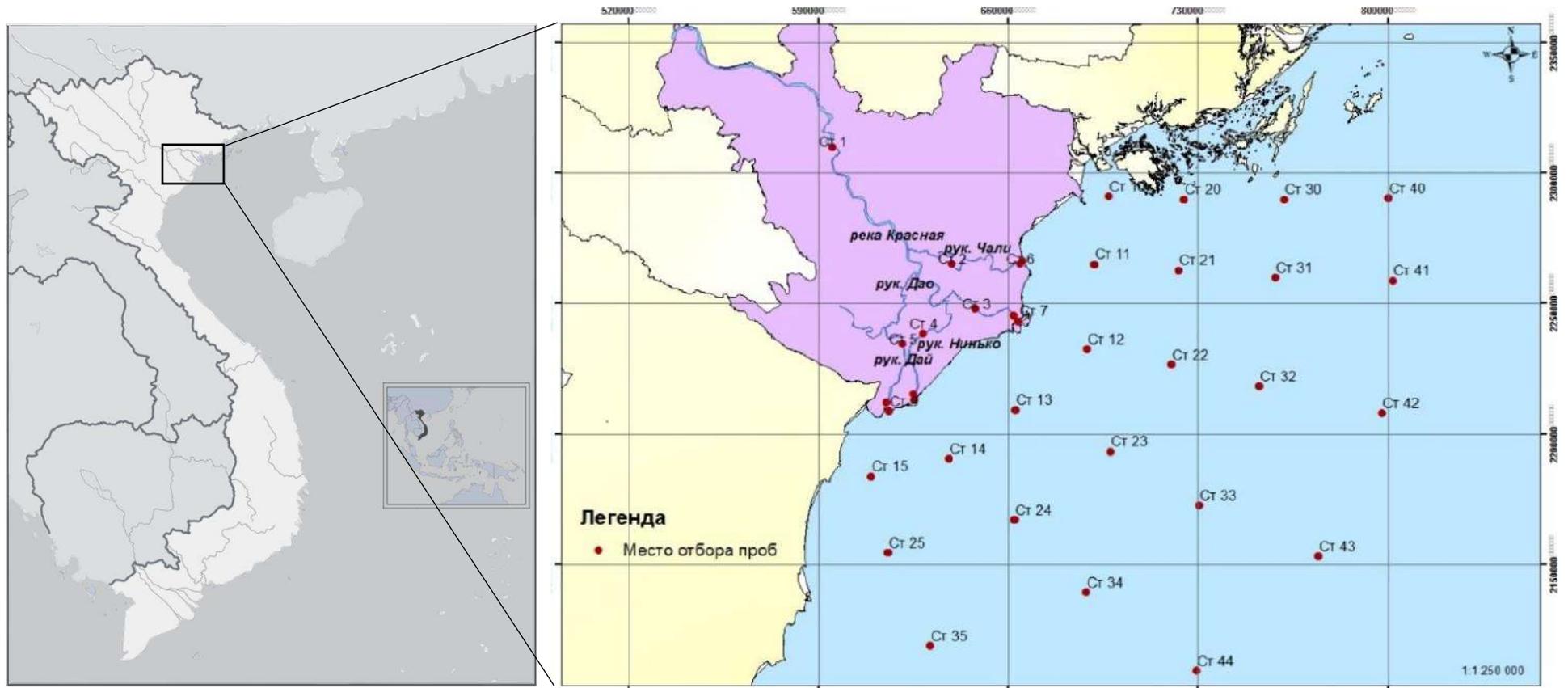


Рисунок 3 – Карта-схема района исследования

Объем выполненных работ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Объем работы, выполненной по теме диссертации

Водный объект	Количество станций	Количество проб				
		Вода	Взвешенное вещество	ДО	Моллюски	Рыбы
Река Красная	4	56	56	56	112	110
Рукав Чали	3	42	42	42	112	80
Рукав Нинько	3	42	42	42	112	80
Рукав Дай	3	42	42	42	112	80
Устьевое взморье	24	336	336	336	112	153
Всего	37	518	518	518	560	503

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.

Отбор проб воды

Пробы воды для определения содержания ртути отбирали в полиэтиленовые бутылки объемом 0,5 л. В лабораторных условиях пробы воды фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Фильтрат фиксировали 1 %-й HNO_3 (1 мл фиксатора на 100 мл пробы). До анализа пробы хранились в холодильнике при 2–10 °С не более 2 суток. При добавлении 5 % раствора марганцовокислого калия KMnO_4 до розовой окраски пробы могли хранить от 2 до 30 суток. После фильтрации фильтры (взвешенное вещество) высушивали при комнатной температуре и хранили в пластиковых чашках Петри (Лапердина, 2000).

Параллельно на каждой станции отбирали пробы воды объемом 0,5 л для определения содержания общих форм железа и органического углерода.

Отбор проб ДО

Донные отложения отбирали дночерпателем с глубиной захвата 0–5 см (поверхностный горизонт ДО) и 5–10 см (нижний горизонт ДО). Пробы помещались в пластиковый контейнер и в лабораторных условиях высушивались в сушильном шкафу при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния.

Отбор проб фитопланктона, зоопланктона и зообентоса

Пробы планктона разделяли полиамидными ситами с размером ячеек 450, 120 и 50 мкм. На сите с наибольшим размером ячеек оставался зоопланктон, ветвистоусые, веслоногие ракообразные и крупные коловратки. Проба из сита с размером ячеек 50 мкм состояла из фитопланктона с примесью мелких инфузорий и коловраток. Отмечается, что в составе фитопланктонных проб доминировали тропические водоросли *Oscillatoria perornata*, *Phormidium muscosum*, *Epithema cistula*, *Microcystis litoralis*.

В зоопланктоне доминировали *Mongolodiptomus birulai*, *Tropodiptomus oryzanus*, *Heliodiptomus falxus* (Calanoida), *Schmackeria*, *Pseudodiptomus* (Copepoda).

Зообентос представляли *Corophium minutum*, *Grandidierella vietnamica*, *Kamaka palmata* (Amphipoda), *Cyathura truncata* (Isopoda).

Отбор проб моллюсков

Моллюсков собирали с прибрежной зоны реки и взморья вручную, замораживали при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для исследования содержания ртути мягкое тело моллюсков вынимали из раковины, просушивали фильтровальной бумагой. Затем пробы высушивали в сушильном шкафу в течение 48 ч и хранили при комнатной температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отбор проб рыб

Рыбу для анализа приобретали у рыбаков, замораживали при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в лабораторных условиях проводили биометрический анализ. Мышечная ткань

высушивалась при комнатной температуре до сухого состояния и упаковывалась в полиэтиленовые пакеты.

2.2 Методы анализа

Определение ртути

В настоящее время разработано большое количество методов определения ртути и ее соединений в природных водах: атомно-адсорбционные, атомно-флуоресцентные, атомно-эмиссионные, хроматографические, нейтронно-активационные, электрохимические, спектрофотометрические и др. (Лапердина, 2000). Измерение массовой концентрации общей ртути атомно-адсорбционным методом приводилось по следующей схеме [ПНД Ф 14.1:2:4.271-2012, РД 52.18.827-2016, РД 52.18.843-2017]: кислотная минерализация → восстановление катионов ртути раствором хлорида олова (II) → перенос атомарной ртути Hg^0 в аналитическую кювету анализатора током воздуха (метод «холодного пара») → измерение атомного поглощения ртути на резонансной длине волны 253,7 нм.

В зависимости от матрицы пробы можно выбрать один из двух методов минерализации (перманганатная и бромид-броматная минерализация). При работе использовался атомно-адсорбционный метод с бромид-броматной минерализацией пробы.

Первым шагом является минерализация органических соединений ртути в пробе воды смешиванием порции исследуемой воды со свежеприготовленной бромид-броматной смесью в соотношении 40 : 1. Она приготовлена смешиванием 0,05 М раствора монохлорида брома ($\text{KBr} + \text{KBrO}_3$, 2 : 1) в растворе 4 М соляной кислоты (HCl) в соотношении 7,5 : 1 [Standard Methods, 1999].

Второй шаг – это восстановление катионов ртути из минерализата до летучей атомарной ртути Hg^0 с использованием раствора дихлорида олова в реакционном сосуде приставки РП-92 (метод «холодного пара»).

Третий шаг заключается в определении атомарной ртути на анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции с приставкой РП-91 («ЛЮМЕКС», г. Санкт-Петербург) [ПНД Ф 14.1:2:4.271-2012, РД 52.18.827-2016, РД 52.18.843-2017].

Определение органического углерода

Метод определения общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$) ТОС основан на окислении соединений углерода, находящихся в пробе воды, до CO_2 и последующем определении общего углерода с использованием детектора инфракрасного излучения [ГОСТ 31958-2012].

Для определения $C_{\text{орг}}$ во взвешенном веществе и в ДО использовали высокотемпературный метод на приборе LAR AG в лаборатории инженерной экологии Вьетнамского морского университета. Взвешенное вещество высушивали в сушильном шкафу при $60\text{ }^\circ\text{C}$ до постоянного веса и далее промывали раствором HCl 0,1 М для удаления минеральных карбонатов.

В рамках метода проба сжигается при $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$. Данная температура гарантирует полное окисление всех углеродных соединений до CO_2 без применения катализатора. Затем концентрация CO_2 анализируется при помощи недисперсного инфракрасного детектора (NDIR). Таким образом, значения общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$), а также неорганического углерода могут быть определены в течении 3 минут.

Метод определения температуры, рН и солености воды

Определение температуры в поверхностном и придонном слое воды производили при помощи батометра Нансена, оборудованного термометрами. Соленость в различных станциях и в поверхностном и придонном слое воды была определена при помощи портативного солемера.

Определение водородного показателя (рН) производили при помощи рН-метра.

Метод определения гранулометрического состава ДО

Гранулометрический состав ДО определялся ситовым методом [ГОСТ 12536-2014].

Разделение грунта на фракции без промывки водой: высушивали пробы ДО до воздушно-сухого состояния, растирали комки в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Отбирали среднюю пробу грунта g_1 по ГОСТу 12536-2014. Отобранную пробу просеивали через сито первого набора (с диаметром отверстий от 10 до 0,5 мм). Фракции ДО, задержавшиеся после просеивания на каждом сите и прошедшие в поддон, необходимо взвесить (g_{ϕ}) и суммировать массы всех фракций грунта. Если полученная сумма масс всех фракций грунта превышает более чем на 1 % массу взятой для анализа пробы, то анализ следует повторить.

Разделение грунта на фракции с промывкой водой: вначале пробы ДО подготавливали, отбирали и взвешивали, далее навеску помещали в фарфоровую ступку, смачивали водой и тщательно растирали пестиком с резиновым наконечником. Навеску частями переносили на сито с диаметром отверстий 0,1 мм и отмучивали под струей воды до тех пор, пока из сита не начинала вытекать прозрачная вода. Оставшиеся на сите промытые частицы высушивали в сушильном шкафу при $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ или при температуре $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$, если грунт органо-минеральный. Каждую фракцию грунта, задержавшуюся на ситах, следует взвесить отдельно (g_{ϕ}).

Содержание в грунте каждой фракции (A , %) вычисляли по формуле (1):

$$A = \frac{g_{\phi}}{g_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где, g_{ϕ} – масса данной фракции грунта, г;

g_1 – масса средней пробы грунта, взятой для анализа, г.

2.3 Методика обработки данных

Метод статистической обработки данных

Статистическую обработку результатов проводили с использованием специализированных программных пакетов SPSS 26 и STATGRAPHICS Centurion XVIII.

Результаты средних морфологических показателей, концентраций веществ представили в виде средних значений и их ошибок ($x \pm mx$).

Достоверность различий оценивали методом многофакторного дисперсионного анализа (ANOVA, HSD-тест).

Корреляционный анализ проводили для оценки взаимосвязи между показателями: содержание ртути в воде, взвешенной форме, ДО, мышечных тканях рыб и моллюсков с различными биологическими и абиотическими параметрами водной среды [Шитиков, 2003]. Рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона (r), характеризующий линейную связь между парой исследуемых признаков. Полученные корреляционные связи считались статистически достоверными при $p < 0,05$.

В результате статистической обработки были определены регрессионные уравнения, которые характеризуют форму связи между концентрациями ртути и различными показателями водной среды.

Метод пространственного анализа

Пространственный анализ по теме диссертации выполнен интерполяцией в специализированном программном пакете ArcGIS 10.2.2 (ERSI, USA). Интерполяция предсказывает значения ячеек раstra из ограниченного количества точек данных образца. Существует много методов интерполяции, такие как ОВР, кригинг, естественный сосед, сплайн, сплайн с барьерами, топо в растр и тренд [Лычак, 2005]. Пространственное распределение различных миграционных форм ртути интерполируется с использованием метода кригинга. Кригинг – это улучшенный геостатистический метод, который строит предполагаемую поверхность из набора точек с z -значениями (инструмент Кригинг (Kriging) в наборе инструментов Интерполяция (Interpolation) в пакете ArcToolbox).

В результате были построены карты пространственного распределения ртути в воде, во взвешенной форме и в ДО.

Метод определения уровни биоаккумуляции и биомagniфикации ртути

Для определения степени биоаккумуляции ртути гидробионтами в устьевой области р. Красная рассчитаны коэффициенты биологического накопления,

представляющие отношение содержания ртути в живых организмах к ее концентрации в воде (K_a) и в донных отложениях (K_d) [Перельман, 1979]:

$$- \text{ по отношению к воде } - K_a = \frac{Hg_{\text{ткань}}^{2+}}{Hg_{\text{вода}}^{2+}}; \quad (2)$$

$$- \text{ по отношению к донным отложениям: } K_d = \frac{Hg_{\text{ткань}}^{2+}}{Hg_{\text{ДО}}^{2+}}. \quad (3)$$

Расчет коэффициентов биомagniфикации (K_b), характеризующих аккумуляцию ртути гидробионтами по пищевым цепям от низших трофических уровней к высшим, проводили по формуле [Strand, 2005]:

$$K_b = \frac{Hg_x}{Hg_j} \quad (4)$$

где Hg_x – содержание ртути в потребителе (хищнике);

Hg_j – содержание ртути в объектах питания (жертвах).

ГЛАВА 3 ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ

3.1 Гидролого-гидрохимическая оценка воды

Как известно, миграционные формы ртути в водной среде определяют интенсивность их биоаккумуляции и токсичности для гидробионтов. Распределение форм нахождения и миграции ртути зависит не только от их концентрации, но и от гидрологических и гидрохимических условий водной среды, поэтому при исследовании распределения миграции ртути в устьевой области р. Красная в первую очередь необходимо рассмотреть гидролого-гидрохимические характеристики данной области (Приложение 1).

В устьевой области р. Красная взаимодействуют 3 водные массы: пресная речная вода, опресненные воды взморья залива Бак Бо и соленые воды Восточного моря. В целом соленость в водах устьевой области р. Красная зависит от удаленности от ее морского края, приливов, фазы водного режима.

Установлено, что в межень условная граница распространения пресных вод (соленость $< 1 ‰$) находится в дельте реки; основной зоной распределения опресненных вод (соленость 5–22 ‰), имеющих генетические связи с приливно-отливными водами и стоками из залива Бак Бо, является мелководная часть устьевого взморья; соленые морские воды (соленость 22–30 ‰) начинают господствовать за 20–30 км от берега. Однако граница зоны пресных вод определяется водным режимом. Максимальные среднемесячные расходы воды р. Красная у г. Вьетчи составляют более 3 000 м³/с и обычно наблюдаются в период летнего половодья (июль и август), минимальные – 200–300 м³/с – в межень (февраль–апрель). Под действием больших стоков речных пресных вод, особенно в период летнего половодья, зона опресненных вод на взморье от устьев протоков и р. Красная расширяется до 40 км от границы берега, в межени такое расстояние понижается до 20 км от края берега.

Поверхностный слой вод притоков и взморья характеризовался достаточно высокой температурой, значения которой зимой находились в пределах 15–17 °С, в летнее половодье – от 26 до 28 °С. Наиболее высокая температура воды (в июле) обычно достигает 28 °С, в маловодные годы (в 2016 г.) температура воды достигает 30 °С. Термическая вариация между поверхностными и придонными слоями воды отмечена в 0,4–0,6 °С в летнее время и 0,2–0,4 °С в зимний период.

Значения рН воды во всех изученных водотоках были нейтральными (6,9–7,5), а на взморье варьировали от нейтральной до слабощелочной среды (7,5–8,3).

Вода устьевой области р. Красная в течение года характеризуется высоким содержанием растворенного кислорода. Средние концентрации растворенного кислорода в воде варьировали в пределах 5,5–11,2 мг/л (в межени) и 6,8–7,5 мг/л в летнее половодье [Нгуен, 2017].

Средние содержания органических веществ в воде устьевой области р. Красная были высокими. Значение химического потребления кислорода (ХПК) колебалось от 13 до 24 мгО₂/л. Среднее значение БПК₅ превышало уровень ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения в 1,5–2,1 раза. Высокие значения ХПК и БПК₅ объясняются поступлением в речную систему р. Красная хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод из больших городов, особенно из столицы Ханой, с рисовых полей и промышленных центров, сосредоточенных на территории дельты р. Красная.

Актуальной проблемой устьевой области р. Красная является аммонийное загрязнение, особенно серьезно наблюдающееся в зоне южнее Ханоя, где концентрация NH₄⁺ составляет более 0,32 мг/л (2–2,3 ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения).

На территории Рамсарского угодья и взморья превышение ПДК для соединений азота, БПК и ХПК отмечено не было.

Временные закономерности распределения форм азота характеризуются наличием пика в летнее половодье. Циркуляция воды между отложениями и разными водными слоями является причиной повышения содержания нитратов в поверхностных водах. В период летнего половодья при высокой температуре

воды процесс разложения органических соединений в ДО протекает интенсивнее и образуется аммиак. Такие части аммиака участвуют в реакции гидролиза, образуя аммоний в толще воды. Это объясняется превышением в период половодья концентрации NH_4^+ в 2 – 2,3 раза ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения.

Содержание фосфора повышается во времени межени. Средние концентрации фосфатов и общего растворенного фосфора варьировали в пределах 0,04–0,35 мг/л в летнее половодье и 0,05–0,72 мг/л в период межени. Особенность фосфорного режима связана с ослаблением биологического самоочищения при понижении температуры в зимний период.

В устьевой области р. Красная отмечаются повышенные концентрации тяжелых металлов, которые часто превышают норматив Вьетнама для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Превышение наблюдается для железа, меди, цинка и мышьяка. Наиболее серьезное загрязнение железом отмечено в Ханое, взморье Тхайбинг и Намдинг, где средние концентрации железа в половодье составляли 10 и более ПДК. В таких акваториях также наблюдалось превышение ПДК по меди в 2 раза. Средние концентрации цинка на взморье отмечены на уровне 1,5–2 ПДК. Концентрация мышьяка наблюдалась в среднем на уровне 0,6–1,5 ПДК, а максимум – в 3–4 раза – южнее Ханоя и вблизи Ба Лат.

3.2 Распределение взвешенного вещества

Изменение концентрации взвешенного вещества (ВВ) в воде устьевой области р. Красная представлено в рисунке 4 (Рисунок 4). Количество ВВ в водотоках сильно различалось. Минимальная концентрация ($40 \pm 1,7$ мг/л) была отмечена в воде протока Дай, а максимальная ($113 \pm 6,2$ мг/л) – в воде равнинной части р. Красная. Причинами повышения концентрации ВВ в воде р. Красная являются слабая противоэрозионная устойчивость грунтов в бассейне речной системы, большая неравномерность стока воды, высокие скорости течения р. Красная и – особенно – массовая вырубка лесов на севере Вьетнама для

высвобождения земель под сельское хозяйство. Мелкие взвешенные наносы, имеющие преимущественно красноватый цвет, образуют естественные фоновые цветности речных вод, что послужило основанием для названия реки: Hong (вьетнам. – красный) [Нгуен, 2017].

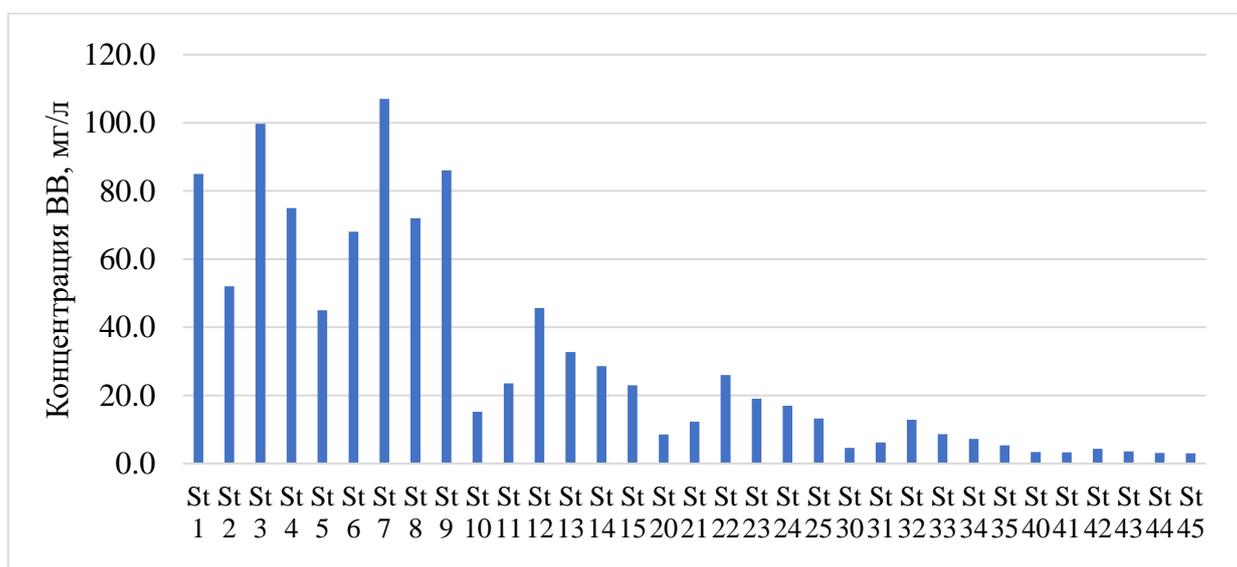


Рисунок 4 – Распределение взвешенного вещества на различных станциях устьевой области р. Красная

Наиболее значительные изменения концентрации ВВ приходились на приближенный к устью р. Красная участок Балат (станции 7–12). На этом участке градиент концентраций ВВ составлял в среднем 5,6 мг/л на 1 км. На станциях 7, 8 и 9 отмечены лавинные концентрации ВВ в воде (102–113 мг/л). На морской станции 42, на удалении 35 км от устья реки, отмечается повышение концентраций ВВ до 3,1–4,3 мг/л. Высокие концентрации ВВ в речном районе эстуария объясняются тем, что здесь происходило интенсивное осаждение наиболее грубодисперсной части речных ВВ при благоприятных гидродинамических условиях, создаваемых вследствие замедления скорости речных потоков [Михайлов, 1997]. Вклад в увеличение концентрации ВВ и нарастание вертикального потока вещества на участке Балат вносит также процесс коагуляции тонких частиц, активно протекающий на начальном этапе смешения речных и морских вод [Исупова, 2011].

Интенсивность процесса флокуляции повышается при увеличении солености воды. По данным С. Е. Кукиной [1999] и Tran T. X. [2007], процесс

флокуляции достигает максимума интенсивности при солености 15–20 ‰. Соленость поверхностного слоя воды взморья (станции 22, 32) возрастает с 18 до 26 ‰. В поверхностном опресненном слое воды взморья в устьевой области р. Красная увеличение концентрации ВВ происходит вследствие накопления взвешенных частиц, образовавшихся при флокуляции растворенных веществ.

3.3 Распределение органического углерода во взвешенных веществах и донных отложениях

Концентрации взвешенного органического углерода (C_v) и отношение органического углерода в взвешенном веществе в воде устьевой области р. Красная представлены в таблице 2 (Таблица 2).

Максимальные концентрации взвешенного органического углерода ($2,83 \pm 0,01$ мг/л) приходятся на участок Балат, наиболее приближенный к устью р. Красная. Увеличение концентрации органического углерода здесь обусловлено интенсивным осаждением речных взвешенных веществ, обогащенных терригенным органическим веществом, а также развитием здесь фитопланктонного сообщества, обеспечивающего дополнительную поставку планктоногенного органического углерода. Далее концентрации C_v в воде резко уменьшаются со значительными градиентами и достигают значений 0,2–0,85 мг/л. В морской части устьевой области концентрация C_v в среднем составляет $0,04 \pm 0,002$ мг/л. Как и при распределении концентрации ВВ, повышение концентрации C_v также наблюдается в толще воды маргинального фильтра, что объясняется поступлением тонкодисперсных взвешенных частиц, обогащенных органическим веществом из поверхностных опресненных слоев воды, а также увеличением интенсивности процесса флокуляции органических и неорганических веществ при повышении солености.

Таблица 2 – Распределение взвешенного органического углерода устьевой области реки Красная

№ станции	Участок	Концентрация ВВ, мг/л	Содержание C_B , мг/л	Отношение C_B , %
St 1	Вьетчи	85 ± 1,2	0,56 ± 0,02	0,66
St 3	Р. Красная 1	95 ± 1,3	1,92 ± 0,32	2,03
St 7	Балат 1	113 ± 6,2	2,83 ± 0,01	2,50
St 12	Балат 2	45,2 ± 2,1	2,5 ± 0,02	1,82
St 2	Чали	52 ± 1,9	0,3 ± 0,02	0,52
St 4	Ньинг Ко	75 ± 6,5	0,72 ± 0,03	0,96
St 5	Дай	40 ± 1,7	0,52 ± 0,03	1,16
St 10	Взморье	15,5 ± 0,9	0,12 ± 0,02	0,79
St 11	Взморье	23,2 ± 0,3	0,18 ± 0,01	0,77
St 12	Взморье	45,8 ± 4,5	0,26 ± 0,03	0,57
St 13	Взморье	32,8 ± 1,7	0,23 ± 0,01	0,70
St 14	Взморье	28,2 ± 2,8	0,2 ± 0,01	0,70
St 15	Взморье	23 ± 1,6	0,17 ± 0,02	0,74
St 20	Взморье	8,2 ± 0,8	0,12 ± 0,02	1,41
St 21	Взморье	12,5 ± 1,6	0,15 ± 0,03	1,22
St 22	Взморье	26 ± 4,2	0,19 ± 0,01	0,73
St 23	Взморье	19,3 ± 2,6	0,13 ± 0,02	0,68
St 24	Взморье	17 ± 3,1	0,12 ± 0,02	0,71
St 25	Взморье	13,1 ± 3,5	0,1 ± 0,01	0,76
St 30	Взморье	4,8 ± 0,3	0,05 ± 0,001	1,09
St 31	Взморье	6,3 ± 0,6	0,07 ± 0,002	1,13
St 32	Взморье	12,8 ± 0,6	0,095 ± 0,005	0,74
St 33	Взморье	8,7 ± 0,3	0,08 ± 0,001	0,93
St 34	Взморье	7,2 ± 0,2	0,065 ± 0,005	0,90
St 35	Взморье	5,4 ± 0,4	0,04 ± 0,002	0,75
St 40	Взморье	3,5 ± 0,1	0,023 ± 0,001	0,68
St 41	Взморье	3,3 ± 0,5	0,025 ± 0,001	0,77
St 42	Взморье	4,2 ± 0,1	0,042 ± 0,002	0,95
St 43	Взморье	3,6 ± 0,3	0,032 ± 0,001	0,90
St 44	Взморье	3,1 ± 0,2	0,018 ± 0,001	0,58
St 45	Взморье	3 ± 0,2	0,016 ± 0,001	0,53

Распределение относительного содержания органического углерода во ВВ устьевой области р. Красная характеризуется максимумом в устье р. Красная, что связано с интенсивным поступлением терригенного органического вещества с речным стоком, а также с увеличением планктоногенного органического

вещества. Так, содержание органического углерода во ВВ устьевой области р. Красная повышено на участке Балат, наиболее приближенном к устью р. Красная (2–2,5 %). На морских станциях 22 и 32 на средних глубинах относительное содержание органического углерода увеличивается до 1,41 %. Это явление обусловлено обогащением органического вещества в ВВ, а также удалением из толщи воды минеральной компоненты ВВ, т. к. более тяжелые минеральные частицы быстрее осаждаются на дно, частицы органического состава, обладающие меньшей плотностью, задерживаются в поверхностном слое воды [Лисицын, 1983].

Содержание $C_{\text{орг}}$ в ДО устьевой области р. Красная наблюдается в среднем на уровне $1,75 \pm 0,03$ % (Рисунок 5).

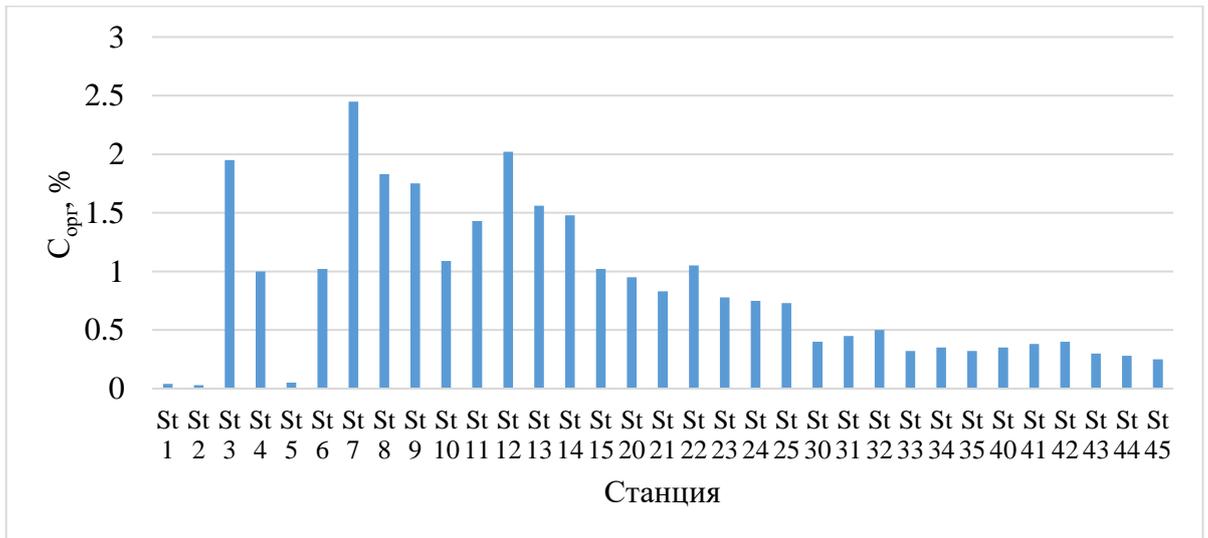


Рисунок 5 – Изменение содержания органического углерода на различных станциях устьевой области р. Красная

Минимальные концентрации были отмечены в верхней части дельты р. Красная (0,03–0,04 %), а максимальные – в устье р. Красная (2,45 %).

Содержание $C_{\text{орг}}$ связано с гранулометрическим составом ДО. При повышении гранулометрического размера увеличивается содержание $C_{\text{орг}}$. Донные отложения протоков Дай и Чали составляет кварцевый песок различной зернистости с примесью гальки и минимальными концентрациями $C_{\text{орг}}$ (0,03 %). В равнинном протоке Нинь Ко, где грунты были представлены пелитовым илом, концентрация $C_{\text{орг}}$ была значительно выше (1,75 %).

В ДО устья Чали, участка Балат, р. Красная у левого берега ниже выхода протока Нинь Ко, представленных пелитовым илом с запахом сероводорода, отмечена максимальная концентрация $C_{\text{орг}}$ ($2,4 \pm 0,15$ %). Содержание $C_{\text{орг}}$ на устьевом взморье составило в среднем $0,75 \pm 0,5$ %.

Таким образом, гидрохимические показатели варьировали по сезонам и по приливным колебаниям. В устьевой области р. Красная взаимодействуют две водные массы: пресные речные и соленые воды Восточного моря. Соленость морских вод до 30 ‰. Температура достаточно высокая (15–30 °С). Вода всех водотоков и взморья относится к категории нейтральной и слабощелочной. Концентрация растворенного кислорода находится в пределах 5,5–11,2 мг/л (в межени) и 6,5–7,5 мг/л в период летнего половодья. Значение БПК₅ превышает ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения в 1,5–2,1 раза. ХПК имеет высокие показания (13–24 мгО₂/л). В период летнего половодья были зафиксированы наибольшие концентрации биогенов, минеральных соединений и токсикантов (10 ПДК для железа, 2 ПДК для меди, 0,6–1,5 ПДК для мышьяка). Их значения снижались в зимнюю межень.

Количество ВВ в водотоках сильно различалось. Минимальная концентрация ($40 \pm 1,7$ мг/л) отмечена в протоке Дай, а максимальная – в равнинной части р. Красная ($113 \pm 6,2$ мг/л). В поверхностном опресненном слое воды взморья в устьевой области р. Красная увеличение концентрации ВВ происходит вследствие накопления взвешенных частиц, образовавшихся в флокуляции растворенных веществ (110 ± 15 мг/л на глубине 12 м).

Максимальные концентрации взвешенного органического углерода ($2,54 \pm 0,23$ мг/л) приходятся на устье р. Красная. Увеличение содержания органического углерода в ВВ связано с интенсивным поступлением терригенного органического вещества с речным стоком, а также с увеличением планктоногенного органического вещества. Далее, при понижении содержания ВВ в воде взморья, содержание органического углерода во ВВ уменьшается до $0,016 \pm 0,001$ мг/л.

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

4.1 Распределение растворенной ртути в воде

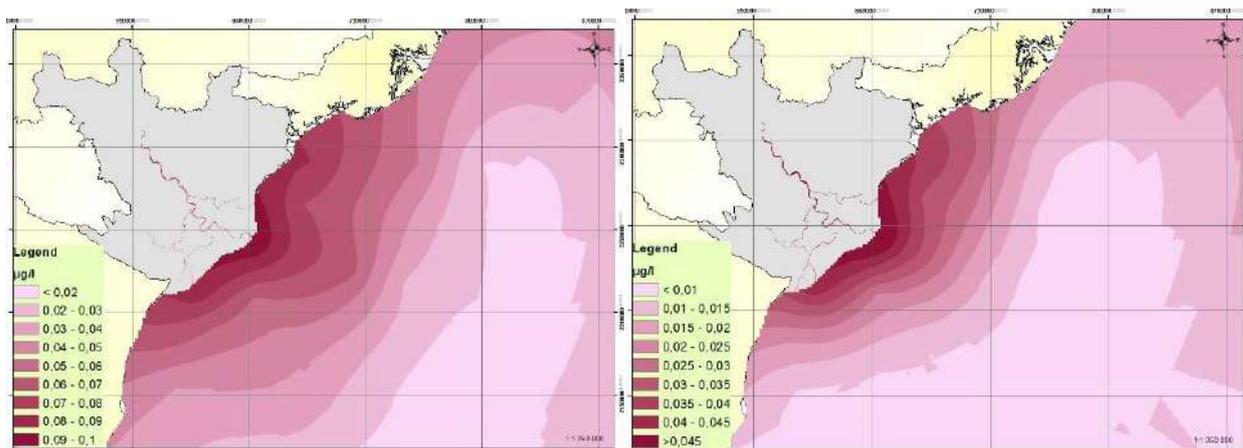
4.1.1 Содержание растворенной ртути в воде

4.1.1.1 Содержание растворенной ртути в поверхностном слое воды

В водных объектах устьевой области р. Красная среднее содержание общей растворенной ртути в поверхностном слое воды изменялось от $0,025 \pm 0,02$ мкг/л в зимнюю межень до $0,055 \pm 0,007$ мкг/л в летнее половодье. 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.

Концентрация растворенной ртути в воде сильно варьирует в зависимости от географии водных объектов. Средние концентрации растворенной ртути в незагрязненных водных объектах северных умеренных широт наблюдались в диапазоне 0,005–0,015 мкг/л [Лобус, 2011]. В воде рек Южной Америки средние ее концентрации колебались от 0,003 до 0,01 мкг/л (Чаплыгин В. А., 2016). При исследовании различных водных объектов Центрального и Южного Вьетнама Н. В. Лобус и его сотрудники [2011] наблюдали, что среднее содержание ртути варьировало в пределах 0,001–0,021 мкг/л в р. Бунг, в провинции Хюе, и в пределах 0,013–0,04 мкг/л в водоемах Южного Вьетнама. Отмечено, что средние концентрации растворенной ртути в устьевой области р. Красная ($0,4 \pm 0,01$ мг/кг) существенно выше по сравнению с другими регионами мира и с другими водными объектами Центрального и Южного Вьетнама.

Пространственное распределение растворенной ртути по гидрологическим сезонам представлено на рисунке 6 (Рисунок 6).



а

б

Рисунок 6 – Пространственное распределение растворенной ртути в воде в устьевой области р. Красная за 2016–2021 гг.:

а – летнее половодье; б – зимняя межень

В р. Красная концентрация растворенной ртути варьирует от $0,049 \pm 0,011$ мкг/л в зимнюю межень до $0,083 \pm 0,007$ мкг/л в половодье. На вершине дельты значение концентрации растворенной ртути наблюдалось достаточно большое, особенно в городе Вьетчи, где средние годовые ее концентрации достигают $0,095 \pm 0,021$ мкг/л. Высокие концентрации загрязнителя в вершине дельты можно объяснить тем, что на данной территории сосредоточены основные антропогенные источники ртути, такие как выбросы и сточные воды предприятий, свалки населенных и промышленных центров. Затем концентрации растворенной ртути в воде поверхностного слоя резко снижаются из-за процесса разбавления ртути по течению водотоков. Понижение скорости течения, перемешивание речных и морских вод и процесс растворения и разложения органических соединений ртути являются причиной повторного повышения растворенной ртути в устье р. Красная ($0,08 \pm 0,01$ мкг/л в период половодья).

В протоке Чали концентрация общей растворенной ртути в поверхностных водах изменялась от $0,04 \pm 0,005$ до $0,07 \pm 0,001$ мкг/л. В протоке Дай максимальное значение общей растворенной ртути ($0,07 \pm 0,002$ мкг/л) наблюдалось в устье протока в половодье, а минимальное ($0,02 \pm 0,001$ мкг/л) – на входе в протоку. В протоке Нинь Ко средние годовые концентрации общей растворенной ртути в поверхностном слое воды составляли $0,06 \pm 0,0012$ мкг/л.

В зоне взморья содержание общей растворенной ртути составляет в среднем $0,03 \pm 0,022$ мкг/л. В результате процессов адсорбции ртути во взвешенных веществах и (далее) нахождения в ДО 70 % содержания растворенной ртути в воде удерживается в зоне маргинального фильтра, что приводит к уменьшению ее концентрации на взморье.

Таким образом, в воде устьевой области р. Красная присутствуют растворенные соединения ртути в концентрациях, до 4 раз превышающих норматив для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Распределение растворенной ртути отличается закономерностью: наибольшие значения выявлены в вершине дельты, по направлению к морю они уменьшаются.

4.1.1.2 Содержание общей растворенной формы ртути в придонном слое

В придонном слое воды водотоков устьевой области р. Красная концентрация растворенной ртути варьирует от 0,005 до 0,12 мкг/л. Картина распределения растворенной ртути в придонном слое воды повторяет ее распределение в поверхностном слое. Максимальное содержание ртути (0,12 мкг/л) также наблюдалось в вершине дельты р. Красная (город Вьетчи). Вниз по течению его значение повышается и на участке Балат (устье р. Красная) составляет 0,1 мкг/л. Далее оно уменьшается до 0,07 мкг/л в зоне маргинального фильтра (что значительно выше содержания растворенной ртути в поверхностном слое воды этой зоны). На устьевом взморье содержание ртути снижается до 0,0045 мкг/л.

Таким образом, пространственное распределение концентрации растворенной ртути в придонном слое воды устьевой области р. Красная совпадает с ее концентрациями в поверхностном слое воды, но значение его максимальных и минимальных уровней ниже, чем в поверхностном слое. Однако в зоне маргинального фильтра содержание растворенной ртути в придонном слое в 2–3 раза выше, чем в поверхностном слое воды. Как в поверхностном, так и в придонном слое содержание общей растворенной ртути на взморье снижается по направлению к морю и составляет в среднем $0,03 \pm 0,025$ мкг/л.

4.1.2 Исследование взаимозависимости концентрации растворенной ртути и различных гидрохимических параметров воды

С целью выявления существования зависимости между показателями водной среды и концентрацией растворенной ртути в воде устьевой области р. Красная нами был проведен корреляционный анализ. Это позволило определить силу и направление статистических связей между гидрологическими, гидрохимическими показателями водной среды и концентрациями растворенной ртути, а также влияние факторов среды на концентрации растворенной ртути в воде. Результаты корреляционного анализа между гидролого-гидрохимическими показателями водной среды, характеризующими водные объекты устьевой области р. Красная (соленость, содержание растворенного кислорода (РК), температура, рН, ХПК) и концентрациями растворенной ртути в воде приведены в таблице 3 (Таблица 3).

Таблица 3- Корреляция между концентрациями растворенной ртути и некоторыми показателями водной среды устьевой области реки Красная

Параметр	Корреляция концентрации растворенной ртути и параметров водной среды*	
	r	p
Температура воды	0,671	0,000
рН	-0,386	0,027
Соленость	-0,864	0,000
ХПК	0,795	0,000
БПК ₅	0,558	0,001
Концентрация железа	0,732	0,000

* r – коэффициент корреляции; p – достоверность

Как видно из таблицы 3, коэффициент корреляции между концентрациями растворенной ртути и температурой воды был довольно высок, достоверен ($r = 0,67, p < 0,05$).

График на рисунке 7 свидетельствует о наличии сильной положительной связи между исследуемыми параметрами: чем больше температура воды, тем

больше концентрация растворенной ртути в воде. При повышении температуры воды интенсивно происходит процесс метилирования ртути в водной среде, т. е. освобождение растворенных соединений ртути из донных отложений, особенно метилов и диметилов ртути, в толщу воды (Рисунок 7).

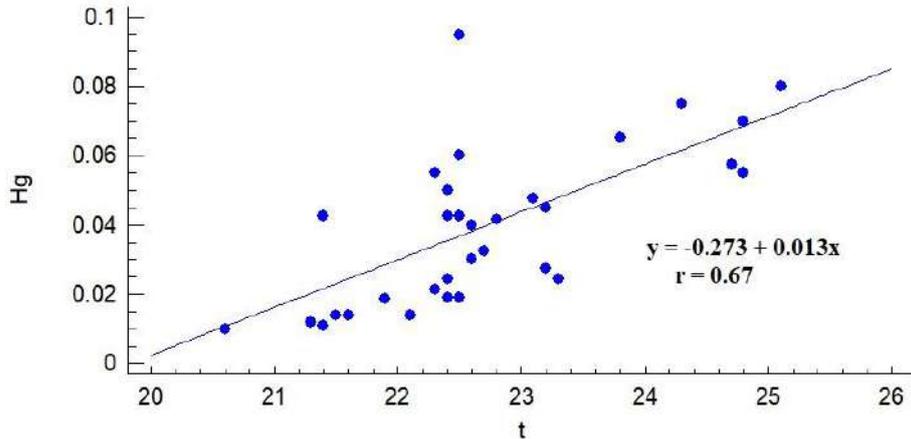


Рисунок 7 – Зависимость содержания растворенной ртути от температуры ВОДЫ

Корреляция между концентрацией растворенной ртути и рН достоверна ($p = 0,027$, меньше 0,05), коэффициент корреляции низкий и отрицательный ($r = -0,386$), соответственно, связь между этими параметрами слабая и обратная.

Коэффициент корреляции между содержанием общей растворенной ртути и соленостью достоверный, связь сильная ($r = -0,864$, $p < 0,05$) (Рисунок 8).

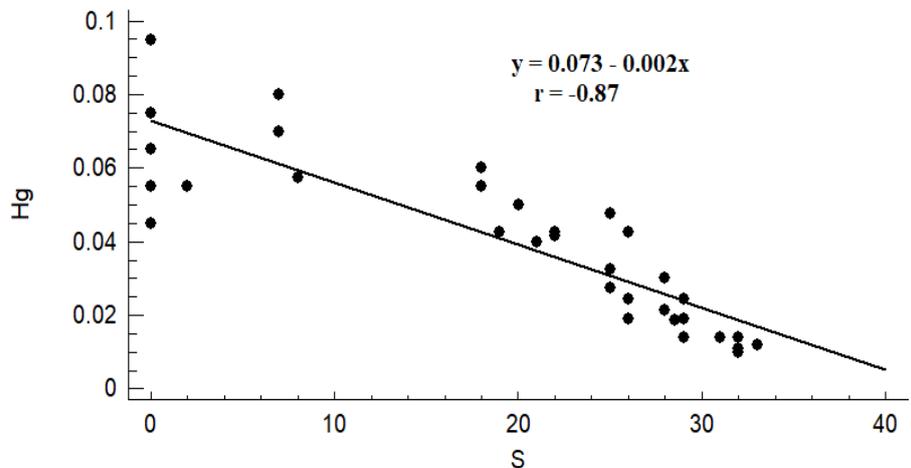


Рисунок 8 – Зависимость содержания растворенной ртути от солености ВОДЫ

Сильная обратная связь между концентрациями растворенной ртути и соленостью на рисунке 8 доказывается усилением концентрации растворенной ртути по направлению к морю. При повышении солености на взморье процессы сорбции ртути во взвешенные вещества и далее нахождения в ДО происходят интенсивнее, т. е. концентрация растворенных соединений ртути в толще воды уменьшается.

Рассматривая корреляцию между содержанием растворенной ртути и концентрациями растворенного кислорода в воде, можно отметить, что она имеет прямой характер ($r = 0,099$), но статистически недостоверна ($p > 0,05$).

Коэффициент корреляции между концентрациями общей растворенной ртути в воде и ХПК (бихроматная окисляемость) демонстрирует тесную положительную достоверную связь ($r = 0,795$, $p < 0,05$) (Рисунок 9): чем выше значения ХПК, тем более интенсивно растворены в воде соединения ртути.

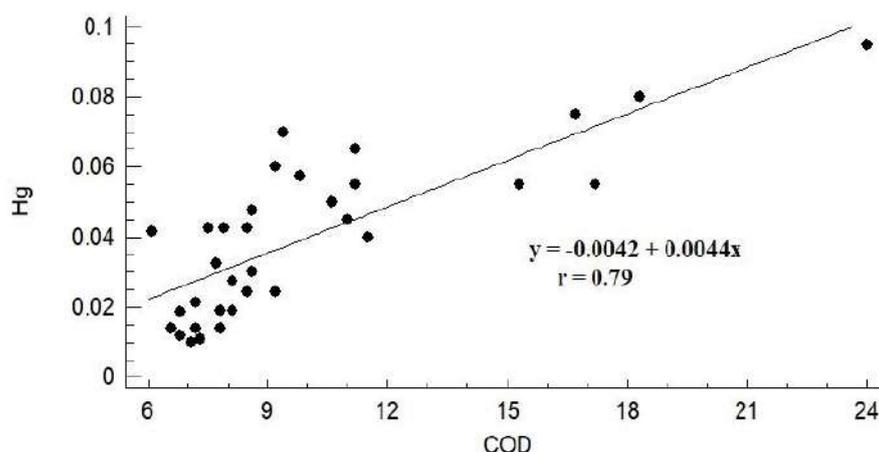


Рисунок 9 – Зависимость содержания растворенной ртути от ХПК

Данная зависимость может быть объяснена способностью адсорбировать ртуть гуминовыми кислотами, составляющими основу ХПК, и далее высвобождением ртути в толщу воду из комплексов с гуминовыми кислотами на границе «вода – донные отложения».

Концентрации растворенной ртути в воде имеют умеренную прямую корреляционную связь со значениями БПК₅ ($r = 0,558$, $p < 0,05$), что свидетельствует о том, что высокие значения БПК₅ способствуют более интенсивному растворению соединения ртути из ДО в толще воды.

Фактором, влияющим на концентрацию растворенной ртути в воде устьевой области р. Красная, является концентрация растворенного железа. Интересно, что связь между концентрациями растворенного железа и ртути имеет сильно значимый характер, т. е. чем больше содержание растворенного железа, тем больше содержание растворенной ртути в воде. В зоне маргинального фильтра оксидгидраты железа, существующие во взвешенной форме, являются сорбентами ртути на поверхности взвешенных частиц, т. е. увеличение гидратов железа, с уменьшением, соответственно, растворенной формы железа приводит к уменьшению растворенной формы ртути в воде.

В результате статистической обработки получено регрессионное уравнение, которое характеризует форму связи между концентрациями растворенной ртути и различными показателями водной среды. Такое уравнение регрессии имеет вид:

$$y = -0,009 + 0,005 \times \text{pH} - 0,001 \times S + 0,002 \times \text{COD} + 0,009 \times \text{Fe} \quad (5)$$

где, y – концентрация растворенной ртути в воде;

pH – значение pH ;

S – соленость воды;

COD – значение ХПК;

Fe – концентрация растворенного железа.

Анализируя полученное уравнение регрессии, необходимо обратить внимание на то, что коэффициент детерминации $R^2 = 0,865$, полученный для найденного уравнения, высокий, при стандартной ошибке оценивания 0,000. Вероятность оценивания составляет $p < 0,05$, соответственно, уравнение статистически значимо. При исследовании уравнении регрессии соленость играет наиболее важную роль в изменении концентрации растворенной ртути в воде, т. к. ее стандартный коэффициент Бета составляет наибольшее значение (0,479). Остальные показатели статистически значимо влияют на концентрацию растворенной ртути в воде ($p < 0,05$).

Таким образом, полученное уравнение регрессии может быть успешно использовано на практике в целях прогнозирования концентрации растворенной ртути в воде устьевой области р. Красная.

4.2 Распределение взвешенной формы ртути в воде

4.2.1 Пространственное распределение взвешенной формы ртути

При оценке миграции взвешенной ртути необходимо рассмотреть два показателя: объемная (мкг/л) и удельная (мкг/г с.м.) концентрации. Объемная концентрация рассчитана как масса ртути во взвешенном веществе, отфильтрованная из 1 л исследуемой воды. Удельная концентрация характеризуется массой ртути, приходящейся на единицу сухой массы взвеси. В водных объектах устьевой области р. Красная средние удельные концентрации взвешенной формы ртути составили $0,311 \pm 0,061$ мкг/г с.м. в поверхностном слое и $0,726 \pm 0,027$ мкг/г с.м. в придонном слое воды, а объемные концентрации находились в диапазоне 0,03–0,18 мкг/л. Пространственное распределение взвешенной формы ртути в поверхностном (Рисунок 10) и придонном слоях воды (Рисунок 11) представлены на рисунках 10 и 11.

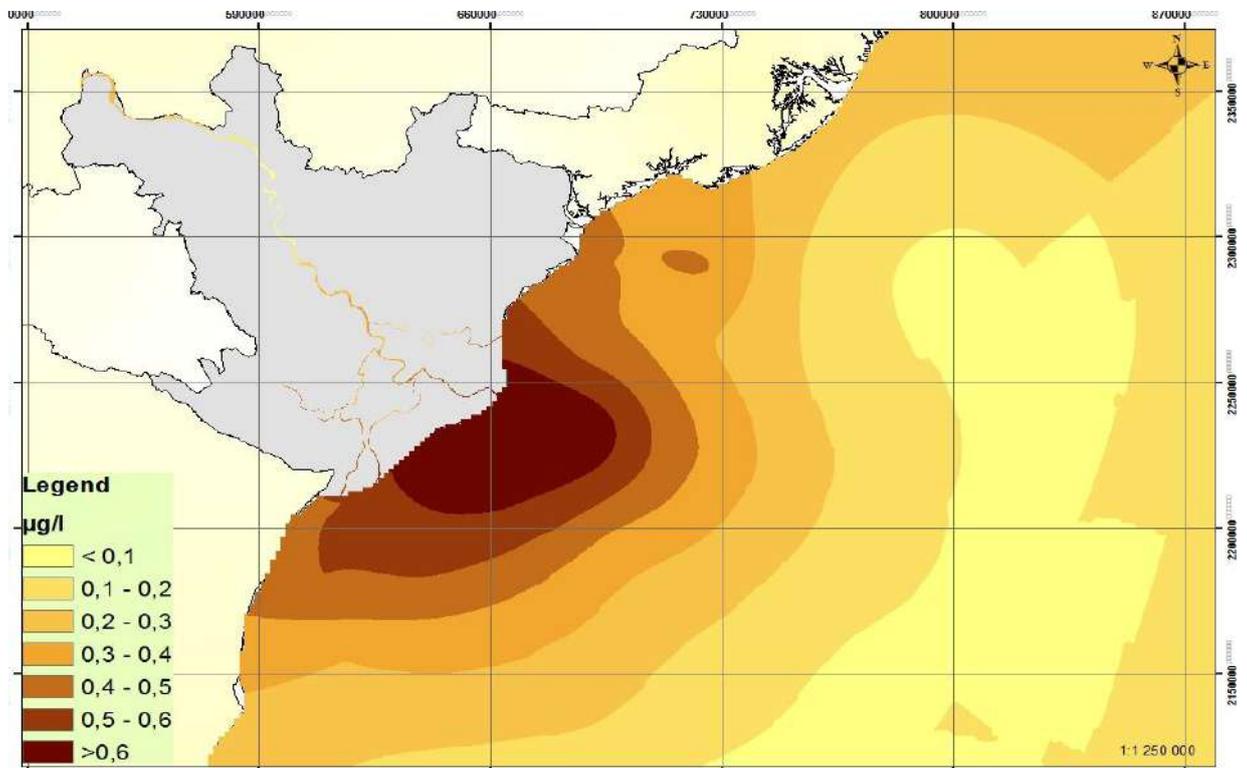


Рисунок 10 – Пространственное распределение взвешенной формы ртути в поверхностном слое воды

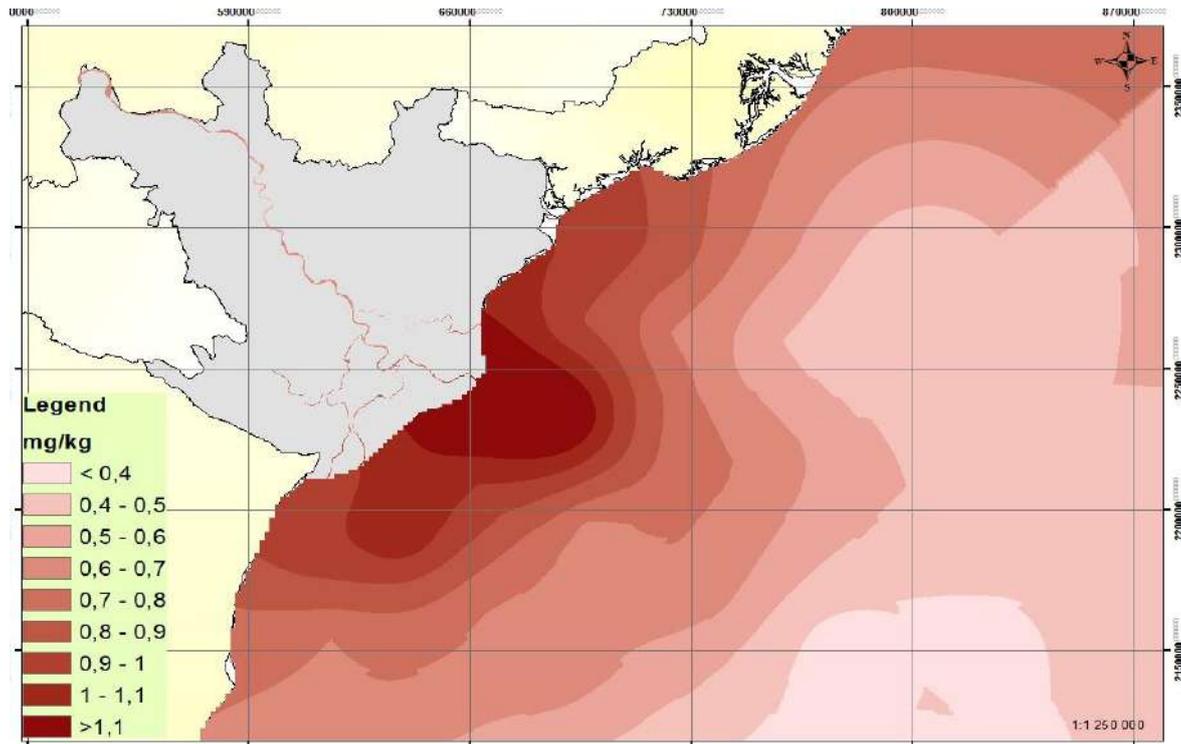


Рисунок 11 – Пространственное распределение взвешенной формы ртути в придонном слое воды

Как видно из рисунков 10 и 11, выявлена закономерность распределения взвешенной ртути: ее концентрация в водотоках постепенно увеличивается по течению и достигает максимума в устье водотоков. Такие максимальные значения наблюдаются до зоны маргинального фильтра на расстоянии 25–30 км от берега, далее за границей этой зоны концентрация взвешенной ртути постепенно уменьшается.

В водах р. Красная содержание взвешенной формы ртути составило $0,4 \pm 0,31$ мкг/г с.м. в поверхностном слое и $0,72 \pm 0,58$ мкг/г с.м. в придонном слое воды. На вершине дельты р. Красная наблюдались минимальные значения содержания взвешенной формы ртути (в среднем $0,085 \pm 0,015$ мкг/г с.м.). Максимальные концентрации взвешенной формы ртути в воде р. Красная составили 0,6–0,7 мкг/г с.м. в поверхностном слое и 0,9–1,25 мкг/г с.м. в придонном слое воды.

В протоках устьевой области р. Красная наблюдается аналогичная картина распределения взвешенной ртути. Максимальные концентрации взвешенной ртути наблюдались в устьях водотоков: $0,32 \pm 0,07$ мкг/г с.м. в поверхностном

слое и $0,8 \pm 0,15$ мкг/г с.м. в придонном слое воды устья протока Чали, $1 \pm 0,015$ мкг/г с.м. в устье протока Дай, а в устье протока Нинь Ко – $0,4 \pm 0,08$ мкг/г с.м. в поверхностном слое и $0,8 \pm 0,15$ мкг/г с.м. в придонном слое.

В зоне маргинального фильтра устьевой области р. Красная среднее содержание взвешенной ртути наблюдалось на уровне $0,45 \pm 0,08$ мкг/г с.м. в поверхностном слое воды и $0,9 \pm 0,15$ мкг/г с.м. в придонном слое. Повышение содержания взвешенной ртути в устье водотока и в зоне маргинального фильтра можно объяснить увеличением содержания сорбентов, особенно оксидгидратов железа и марганца, в виде взвешенных частиц, на которых интенсивно происходят процессы адсорбции растворенных форм ртути, что приводит к увеличению содержания взвешенной ртути.

На взморье (40 км от края дельты) содержание взвешенной формы ртути снижается до $0,08 \pm 0,03$ мкг/г с.м., 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.

4.2.2 Распределение ртути по формам миграции в воде

Анализируя распределение различных миграционных форм ртути в воде устьевой области р. Красная, необходимо рассмотреть относительное содержание общей растворенной формы ртути по сравнению с валовой. На большинстве исследуемых станций относительное содержание общей растворенной формы ртути не превышало 50 % валовой, т. е. концентрация растворенной ртути не превышала концентрацию взвешенной формы ртути в воде (Рисунок 12).

Из рисунка 12 видно, что от 2 до 63 % ртути мигрирует в растворенной форме. В дельтовых водотоках это значение изменяется от 11 до 63 %. Наиболее высокое относительное содержание растворенной ртути отмечено в р. Красная (в городе Вьетчи, 63 %), протоках Чали (22 %) и Нинь Ко (21 %), соответственно, 63, 22 и 21 % валовой ртути мигрируют в растворенной форме. На взморье большая

часть ртути мигрирует во взвешенном веществе. Здесь относительное содержание растворенной ртути наблюдается от 2 до 8 %.

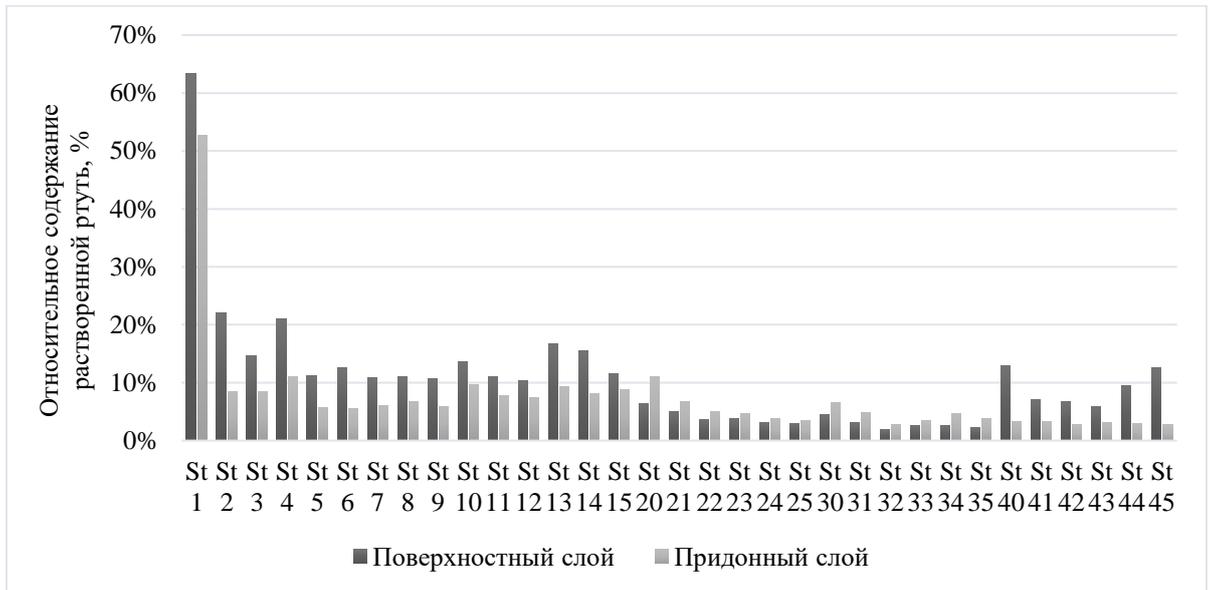


Рисунок 12 – Относительное содержание общей растворенной формы ртути в воде устьевой области р. Красная

Повышенное содержание взвешенной формы ртути в воде устьевой области р. Красная объясняется тем, что в водотоках, особенно в их устьях, постоянно происходит интенсивное турбулентное перемешивание прогреваемой водной толщи с донными отложениями, освобождение соединений ртути из донных отложений в толщу воды и образование комплексов с ВВ из-за большого их содержания в воде р. Красная и протоках.

В придонном горизонте относительное содержание растворенной ртути ниже, чем в поверхностном, так, на 32-х из 33 станций содержание растворенной ртути составляло менее 11 %. Лишь на станции 1 (город Вьетчи) 53 % от общего содержания ртути мигрирует в растворенной форме.

4.2.3 Исследование взаимосвязи концентрации взвешенной формы ртути с различными параметрами воды

Для исследования взаимосвязи содержания взвешенной формы ртути с абиотическими параметрами водной среды был проведен корреляционный анализ между различными параметрами (Таблица 4).

Таблица 4 – Корреляция между концентрациями взвешенной ртути и некоторыми показателями водной среды устьевой области реки Красная

Параметр	Корреляция концентрации взвешенной ртути и параметров водной среды			
	в поверхностном слое		в придонном слое	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
Температура воды	0,644	0,000	0,542	0,001
РК	0,37	0,034	0,389	0,025
Концентрация железа	0,85	0,000	0,805	0,000
Содержание ВВ	0,533	0,001	0,364	0,037
$C_{орг}$	0,863	0,000	0,824	0,000

* *r* – коэффициент корреляции; *p* – достоверность,

Как видно из таблицы 4, коэффициент корреляции между концентрациями взвешенной ртути и температурой воды положителен и достоверен ($r = 0,644$ и $0,542$, $p < 0,05$), он свидетельствует о наличии умеренно прямой связи между исследуемыми параметрами: чем больше температура воды, тем выше концентрация взвешенной ртути в воде. При повышении температуры воды интенсивно происходит процесс разложения органических комплексов ртути в ДО и освобождение соединений ртути в толщу воды.

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить, что корреляция между концентрацией взвешенной ртути в поверхностном слое воды и рН имеет прямой характер, но статистически не значима ($p > 0,05$). Связь между концентрацией взвешенной ртути в придонном слое воды и рН достоверна, но слабая.

Корреляционные связи между концентрацией взвешенной ртути и соленостью носят обратный характер, однако статистически достоверна только связь с концентрацией взвешенной ртути в поверхностном слое ($p < 0,05$). Коэффициент такой корреляции низкий и отрицательный ($r = -0,44$), а значит, связь между указанными параметрами слабая и обратная.

Рассматривая корреляцию между содержанием взвешенной ртути и значением растворенного кислорода в воде, можно отметить, что она

достоверна ($p < 0,05$), но низкая положительная: между РК и концентрациями взвешенной ртути отмечена прямая и слабая корреляционная связь.

Корреляционные связи концентрации взвешенной ртути в воде с ХПК и с БПК₅ имеют обратный характер, однако признать их достоверно значимыми нельзя ($p > 0,05$).

Очевидно, оксидгидраты железа являются сорбентами ртути в поверхность взвешенных частиц, т. е. увеличение концентрации оксидгидратов железа в воде приводит к повышению концентрации взвешенной формы ртути. Полученные статистические результаты также доказывают данное явление. Так, коэффициенты корреляции между концентрациями взвешенной ртути и концентрацией железа довольно высокие и достоверные ($r = 0,85$ и $0,805$, $p < 0,05$) и свидетельствуют о наличии сильной прямой связи между исследуемыми параметрами.

В зоне маргинального фильтра соотношение Hg_p/Hg_w , характеризующееся относительной геохимической подвижностью ртути в воде, отрицательно коррелировало с содержанием железа ($r = -0,72$, $p = 0,02$) (Рисунок 13).

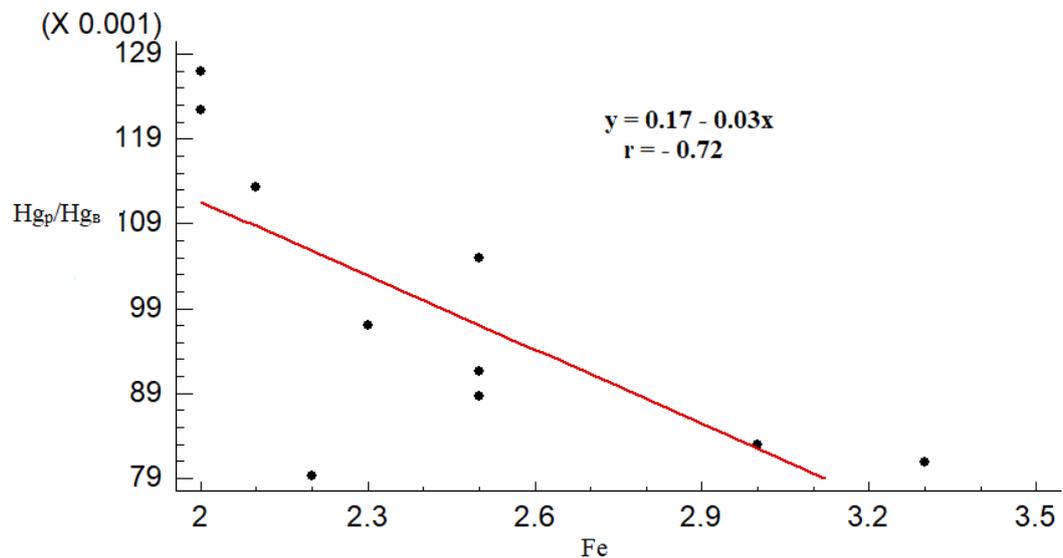


Рисунок 13 – Зависимость относительной геохимической подвижности ртути в эстуарии р. Красная от содержания железа в воде

В пресноводной и морской зонах такие зависимости не обнаружены ($r = 0,11$, $p = 0,86$ и $r = 0,17$, $p = 0,49$ соответственно).

Согласно рисунок 13 геохимическая подвижность ртути в воде зоны маргинального фильтра устьевой области р. Красная уменьшается при повышении содержания железа в воде. По исследованиям В. В. Гордеева и А. П. Лисицына [2014], в зоне маргинального фильтра с повышением содержания взвешенных веществ увеличивается концентрация свежееобразованных частиц оксигидратов железа, которые являются одними из сильнейших и наиболее распространенных природных сорбентов. Этим явлением объясняется увеличение адсорбций ртути в эстуарии р. Красная и ее протоках, которое, в свою очередь, приводит к увеличению содержания ртути во взвешенных веществах, т. е. значение соотношения Hg_p/Hg_v , характеризующегося относительной геохимической подвижностью ртути в воде, уменьшается.

Согласно данным таблицы 4 коэффициент корреляции между концентрациями взвешенной ртути и содержанием взвешенных веществ был положителен и достоверен ($r = 0,533$ и $0,364$, $p < 0,05$) и свидетельствовал о наличии умеренной и слабой прямой связи между исследуемыми параметрами: чем больше содержание взвешенных веществ в воде, тем выше концентрация взвешенной ртути вследствие процесса адсорбции.

Результаты, полученные при анализе зависимости между концентрацией взвешенной ртути и содержанием органических веществ, также свидетельствуют о наличии сильной прямой связи между исследуемыми переменными, т. е. чем больше содержание органических веществ, тем в большей степени образуются комплексы органических соединений с ртутью в виде взвешенной формы.

Для исследования взаимосвязи содержания взвешенной и растворенной формы ртути все исследуемые водные объекты устьевой области р. Красная разделили на 3 зоны:

- I. Пресноводные участки р. Красная и ее протоки (Дай, Чали, Нинь Ко).
- II. Устье р. Красная и ее протоки, зона смешения речных и морских вод (зона маргинального фильтра).
- III. Зона морской воды.

Был отмечен разнонаправленный характер корреляции между содержанием ртути в растворенной (Hg_p) и взвешенной (Hg_b) формах в трех данных зонах акваторий (Рисунок 14).

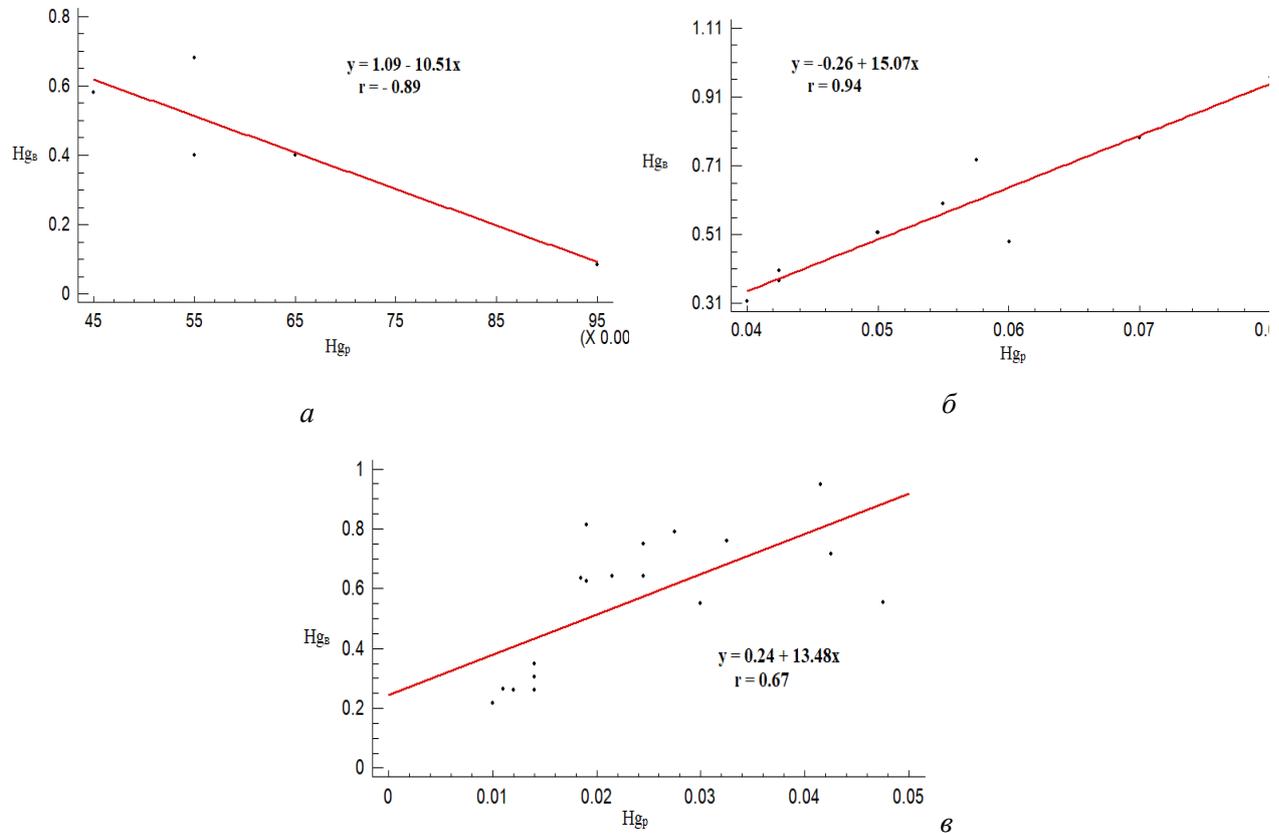


Рисунок 14 – Корреляционные зависимости между Hg_p и Hg_b :

a – р. Красная и ее протоки; *б* – зона маргинального фильтра; *в* – зона морской воды

На пресноводных участках р. Красная и ее протоках зависимость концентрации Hg_p и Hg_b была отрицательной ($r = -0,89$, $p = 0,04$), т. е. при увеличении содержания растворенной ртути понижается концентрация ее взвешенной формы, и наоборот. В устьях реки, протоках и зонах взморья были отмечены положительные достоверные корреляции между содержанием ртути в растворенной (Hg_p) и взвешенной (Hg_b) формах ($r = 0,94$, $p = 0,0001$ и $r = 0,67$, $p = 0,002$ соответственно). Это является объективным свидетельством того, что, чем больше концентрация растворенной ртути, тем выше концентрация взвешенной ртути в воде из-за усиления процесса адсорбции в зоне

маргинального фильтра и дальнейшего осаждения ртути в донных отложения на взморье.

В результате статистической обработки были выведены регрессионные уравнения, которые характеризуют форму связи между концентрациями взвешенной ртути и различными показателями водной среды. Так, для водной экосистемы устьевой области р. Красная уравнение регрессии имеет вид:

$$y = -0,541 + 0,03 \times T - 0,002 \times S + 0,123 \times Fe + 0,125 \times C - 2,835 \times CHg \quad (6)$$

где y – концентрация взвешенной ртути в воде;

T – температура воды;

S – соленость воды;

Fe – концентрация растворенного железа;

C – концентрация органических веществ во ВВ;

CHg – концентрация растворенной ртути.

Анализируя полученное уравнение регрессии, необходимо обратить внимание на то, что коэффициент детерминации $R^2 = 0,841$, полученный для найденного уравнения, высокий, при стандартной ошибке оценивания 0,000. Вероятность оценивания составляет $p < 0,05$, соответственно, уравнение статистически значимо. При исследовании уравнения регрессии концентрация растворенного железа играет наиболее важную роль в изменении концентрации взвешенной ртути в воде, т. к. ее стандартный коэффициент Бета составит наибольшее значение (0,597). Остальные показатели статистически значимо влияют на концентрацию взвешенной ртути в воде ($p < 0,05$).

Таким образом, полученное уравнение регрессии может быть успешно использовано на практике в целях прогнозирования концентрации взвешенной ртути в воде устьевой области р. Красная.

4.3 Распределение ртути в донных отложениях

4.3.1 Содержание ртути в различных горизонтах донных отложений

Содержание ртути в различных горизонтах ДО составляло в среднем $0,9 \pm 0,18$ мкг/г с.м. Вариации содержания ртути по горизонтам в ДО представлены в таблице 5 (Таблица 5).

Таблица 5 – Ртуть в различных горизонтах донных отложений устьевой области р. Красная

Горизонт ДО, см	Максимальное содержание Hg, мкг/г с.м.	Минимальное содержание Hg, мкг/г с.м.	Среднее содержание Hg, мкг/г с.м.
0–5	1,25	0,6	$0,86 \pm 0,19$
5–10	1,32	0,62	$0,94 \pm 0,2$

Концентрация ртути в ДО сильно варьирует в зависимости от географии водных объектов. Средние концентрации ртути в ДО в незагрязненных водных объектах мира и России колеблются в пределах $0,036$ – $0,7$ мкг/г с.м. [Овсепян, 2007]. В воде рек Северной Америки средние ее концентрации колебались от $0,004$ до $2,1$ мкг/г с.м. [Петрухин и др., 1986]. В морской воде Японского моря концентрации ртути наблюдались в среднем в диапазоне $0,036$ – $0,529$ мкг/г с.м. в ДО [Лучшева, 1995]. При исследовании различных водных объектов Центрального и Южного Вьетнама Н. В. Лобус и его сотрудники [2011] наблюдали, что среднее содержание ртути в ДО варьировало в пределах $0,05$ – $0,07$ мкг/г с.м. Таким образом, отмечена следующая закономерность: средняя концентрация ртути в ДО устьевой области р. Красная ($0,9 \pm 0,18$ мкг/г с.м.) существенно выше по сравнению с другими регионами мира и с другими водными объектами Центрального и Южного Вьетнама.

Отмечено, что средняя концентрация ртути в поверхностном горизонте ДО (0–5 см) – $0,86 \pm 0,19$ мкг/г с.м. – ниже, чем концентрация поллютанта в нижнем горизонте (5–10 см) – $0,94 \pm 0,2$ мкг/г с.м., в $1,03$ – $1,25$ раза.

➤ *Ртуть в донных отложениях реки Красная и ее протоках*

В водах р. Красная концентрация ртути в ДО составила $0,8 \pm 0,15$ мкг/г с.м. в горизонте 0–5 см и $0,88 \pm 0,12$ мкг/г с.м. в горизонте 5–10 см, в среднем $0,84 \pm 0,12$ мкг/г с.м. Средние концентрации ртути в ДО р. Красная в 1,68 раза превышают Вьетнамский норматив для ДО пресноводных объектов рыбохозяйственного назначения. На вершине дельты наблюдался минимум значения концентрации ртути в ДО, но он был больше, чем в других водотоках, т. к. на данной территории сосредоточены основные антропогенные источники ртути: выбросы и сточные воды предприятий, свалки населенных и промышленных центров. Далее концентрация ртути в ДО постепенно повышается из-за процесса осаждения ртути в ДО по течению реки. Максимальная концентрация ртути в ДО отмечена в устье (участок Балат – станция 7), где наблюдалось $0,95 \pm 0,03$ 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 ДО (Рисунок 15).

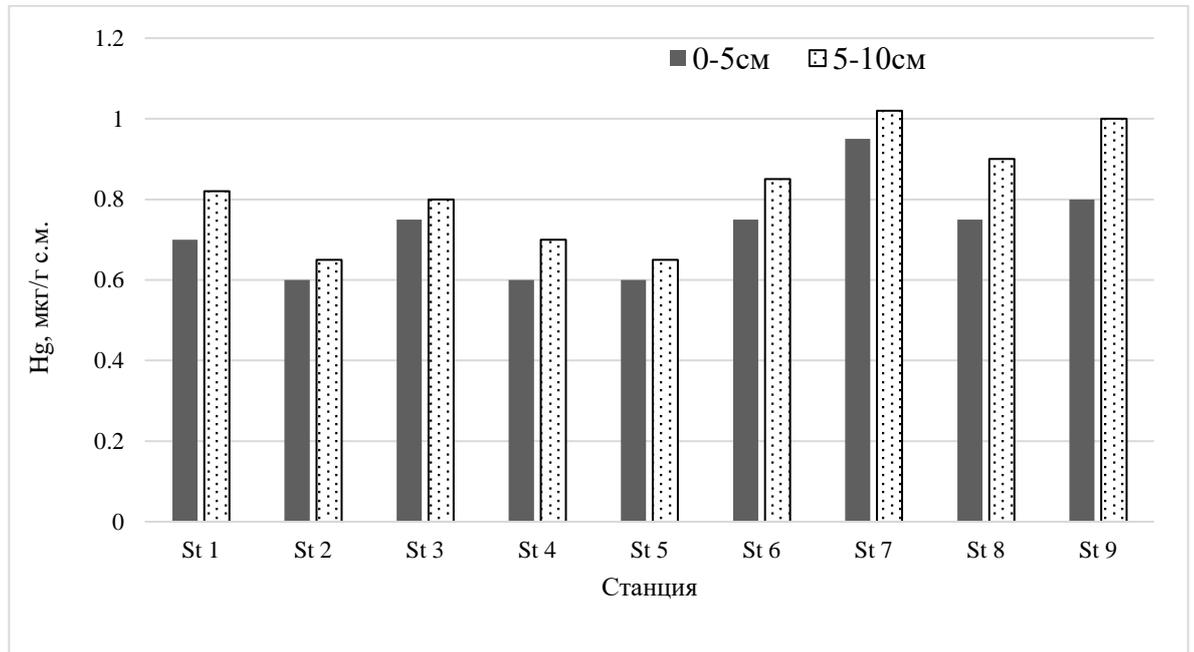


Рисунок 15 – Содержание ртути в различных горизонтах донных отложений реки Красная и ее протоков

В протоке Чали концентрация ртути в ДО изменялась от $0,68 \pm 0,005$ мкг/г с.м. на горизонте 0–5 см и $0,72 \pm 0,03$ мкг/г с.м. на горизонте 5–10 см в донных отложениях. В протоке Дай максимальное значение ртути ($0,78 \pm 0,15$ мкг/г с.м.)

наблюдалось в устье протока, а минимальное – $0,62 \pm 0,03$ мкг/г с.м. – на входе в проток. В протоке Нинь Ко средние годовые концентрации ртути в ДО составляют $0,65 \pm 0,05$ мкг/г с.м.

В устье протоков Чали, Нинь Ко и Дай содержание ртути также наблюдалось на относительно высоком уровне: от 0,75–1 мкг/г с.м. В устье р. Красная и ее протоках, особенно в участке Балат, высокое содержание ртути может свидетельствовать об активной сорбции ртути на взвешенных веществах и – далее – осаждении ртути в ДО в зоне смешения речных и морских вод.

➤ ***Ртуть в донных отложениях акваторий устьевого взморья***

Изменение содержания валовой ртути в ДО на 20 станциях устьевого взморья представлено на рисунке 16 (Рисунок 16).

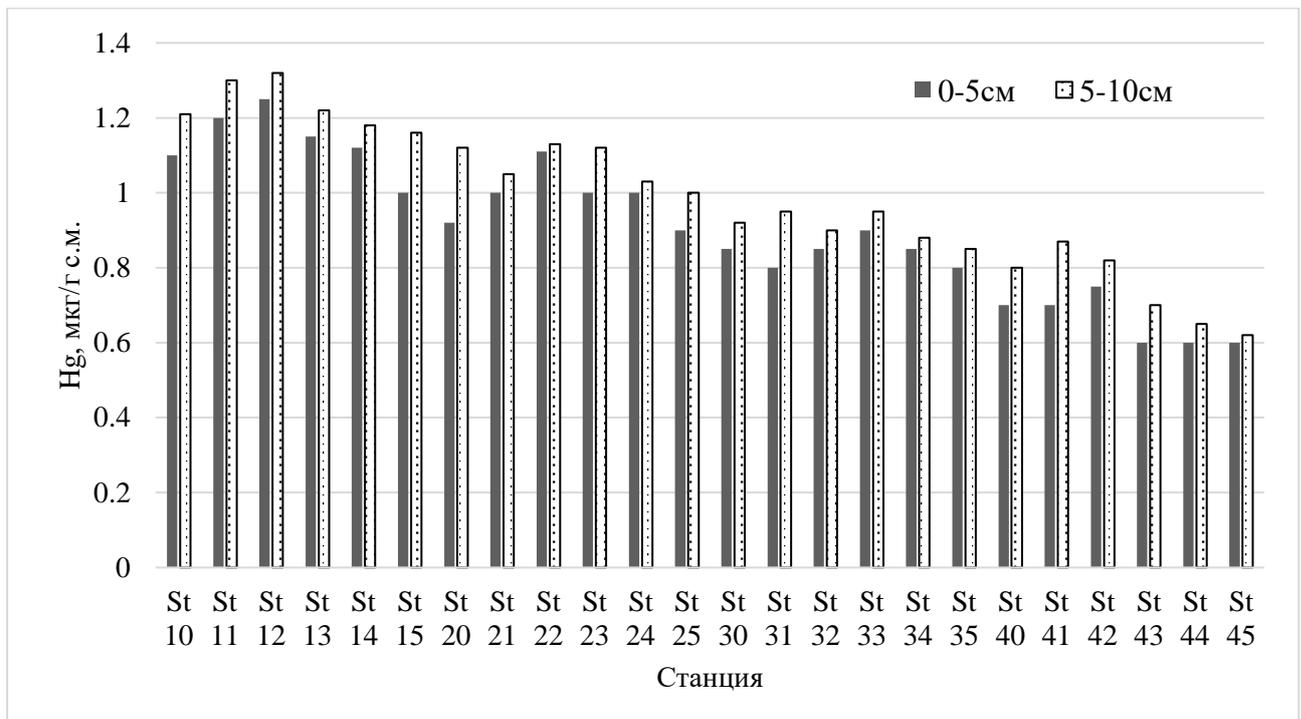


Рисунок 16 – Изменение содержания валовой ртути в различных горизонтах донных отложений в устьевом взморье р. Красная

Содержание ртути и ее соединений в ДО взморья варьировало от 0,6–1,25 мкг/г с.м. на горизонте 0–5 см и 0,62–1,32 мкг/г с.м. на горизонте 5–10 см, средние концентрации $0,94 \pm 0,37$ мкг/г с.м. превышали норматив Вьетнама для ДО солоноватых и морских акваторий в 1,34 раза. На станциях с 10 по 15 наблюдались самые высокие значения содержания валовой ртути ($1,18 \pm 0,14$

мкг/г с.м.), превышающие Вьетнамский норматив для ДО солоноватых и морских акваторий в 1,7 раза. На зоне маргинального фильтра также отмечены высокие содержания взвешенной ртути в воде.

Акватория, располагающаяся за маргинальным фильтром, характеризовалась постепенным снижением содержания валовой ртути до минимальных значений – 0,6 мкг/г с.м.

Следует отметить, что особенность распределения ртути по различным горизонтам ДО заключается в том, что максимальное, минимальное и среднее 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 для накопления ртути в ДО устьевой области р. Красная.

4.3.2 Пространственное распределение ртути в донных отложениях устьевой области реки Красная

В результате интерполяции построена карта пространственного распределения ртути в ДО в различных водотоках устьевой области р. Красная (Рисунок 17).

На рисунке 17 хорошо просматривается закономерность распределения ртути в ДО. Так, ее концентрация в водотоках постепенно увеличивается по течению до устьев водотоков. Такие высокие значения наблюдаются в зоне маргинального фильтра на расстоянии 25–30 км от кромки берега, далее за границей этой зоны концентрация ртути в ДО достигает максимума и постепенно уменьшается.

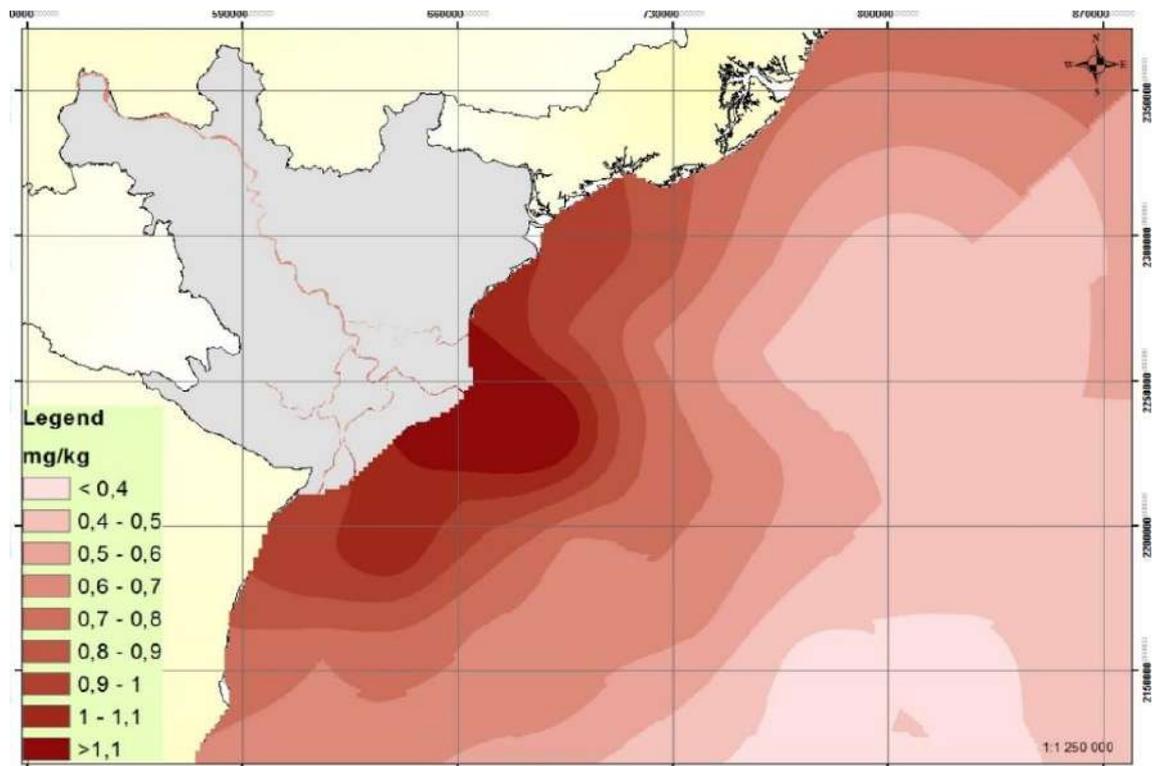


Рисунок 17 – Пространственное распределение ртути в донных отложениях устьевой области р. Красная

На вершине дельты р. Красная наблюдалось минимальное содержание ртути в ДО ($0,84 \pm 0,12$ мкг/г с.м. в среднем). Максимальная концентрация ртути в ДО р. Красная составила $0,99 \pm 0,04$ мкг/г с.м. в устье Балат. В протоках устьевой области р. Красная наблюдалась аналогичная картина распределения ртути в ДО. Максимальные концентрации ртути в ДО наблюдались в устьях водотоков: $0,8 \pm 0,05$ мкг/г с.м. в устье протока Чали, $0,825 \pm 0,075$ мкг/г с.м. в устье протока Дай, $0,9 \pm 0,1$ мкг/г с.м. в устье протока Нинь Ко. По течению водотоков растворенные формы ртути разбавляются и постепенно аккумулируются в ДО. В результате процессов адсорбции и понижения скорости течения в устьях водотоков степень аккумуляции ртути в ДО увеличивается, т. е. приводит к повышению концентрации ртути в ДО устьев речной системы р. Красная.

В зоне маргинального фильтра устьевой области р. Красная наблюдаются высокие значения содержания ртути в ДО ($1,14 \pm 0,05$ мкг/г с.м. на горизонте 0–5 см и $1,23 \pm 0,03$ мкг/г с.м. на горизонте 5–10 см). Повышение ртути в зоне маргинального фильтра можно объяснить увеличением содержания сорбентов,

особенно оксидгидратов железа и марганца, в которых интенсивно происходят процессы адсорбции растворенных форм ртути, что приводит к увеличению содержания ртути, переносимой на взвешенном веществе. За границами маргинального фильтра комплексы сорбентов – ртути с взвешенных веществ осаждаются в ДО, концентрации ртути в ДО данной акватории достигают максимума ($1,25 \pm 0,1$ мкг/г с.м. на горизонте 0–5 см и $1,32 \pm 0,05$ мкг/г с.м. на горизонте 5–10 см).

Далее в результате процессов самоочищения водной экосистемы и понижения адсорбции, концентрации ртути в ДО постепенно уменьшаются.

4.3.3 Взаимосвязь между содержанием ртути в донных отложениях и различными параметрами водной среды

Для исследования взаимосвязи содержания ртути в ДО с абиотическими параметрами водной среды был проведен корреляционный анализ, результаты которого представлены в таблице 6 (Таблица 6).

Таблица 6 – Корреляционная зависимость между концентрациями ртути в ДО и некоторыми показателями водной среды устьевого области р. Красная

Параметр	Корреляция концентрации ртути в ДО и параметров водной среды	
	r^*	p
Температура воды	0,058	0,749
pH	0,313	0,076
Соленость	0,165	0,36
РК	0,078	0,664
ХПК	-0,116	0,52
БПК ₅	0,25	0,89
Концентрация железа	0,711**	0,000
Содержание взвешенных веществ	-0,087	0,629
$C_{орг}$	0,553**	0,001
Концентрация растворенной ртути	0,158	0,379
Концентрация взвешенной ртути в придонном слое воды	0,66**	0,000

* r – коэффициент корреляции; p – достоверность; ** зависимость статистически достоверная (при $p < 0,05$).

Как видно из таблицы 6, между концентрациями ртути в ДО и гидрохимическими показателями (температура, рН, соленость, РК, ХПК, БПК₅, содержание ВВ и концентрация растворенной ртути) статистически значимые корреляции ($p > 0,05$) отсутствуют.

Коэффициент корреляции между концентрациями ртути в ДО и концентрациями железа был довольно высок, положителен и достоверен ($r = 0,711$, $p < 0,05$), что свидетельствует о наличии сильной прямой связи между исследуемыми параметрами. Это является объективным свидетельством того, что большая концентрация железа в воде приводит к большей концентрации ртути в ДО. В присутствии большого количества железа, особенно оксидгидратов железа, интенсивно происходит процесс адсорбции ртути во взвешенные вещества, и в дальнейшем интенсивно создаются комплексы ртути в ДО.

Результаты, полученные при анализе зависимости между концентрацией ртути в ДО и содержанием органических веществ, свидетельствуют о наличии прямой связи между исследуемыми переменными ($r = 0,553$, $p < 0,05$), т. е. чем больше содержание органических веществ, тем в большей степени образуются комплексы органических соединений с ртутью, осаждающихся в ДО.

На рисунке 18 представлены корреляционные зависимости между содержанием ртути в поверхностном горизонте ДО и содержанием взвешенной ртути в придонном слое воды (Рисунок 18).

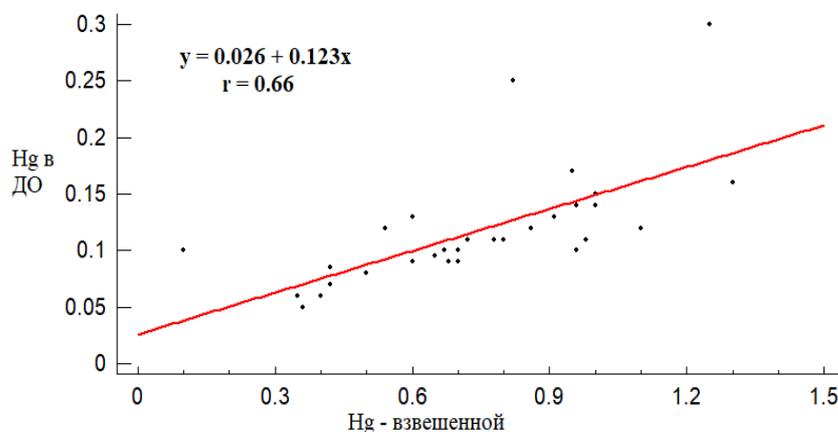


Рисунок 18 – Зависимость между содержанием ртути в донных отложениях и содержанием взвешенной формы ртути в придонном слое воды

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить, что корреляция между концентрацией взвешенной ртути в придонном слое воды и ее концентрацией в ДО имеет прямой характер, достоверная ($r = 0,66, p < 0,05$). При высоком содержании взвешенной ртути в воде повышается процесс адсорбции ртути донными отложениями, т. е. повышается ее содержание в ДО, а при низком содержании ртути в воде происходит освобождение ртути из ДО в толщу воды путем десорбции.

В результате статистической обработки были выведены регрессионные уравнения, которые характеризуют форму связи между концентрациями ртути в ДО и различными показателями водной среды. Так, для водной экосистемы устьевой области р. Красная, уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,137 + 0,012 \times S + 0,244 \times Fe - 0,025 \times C + 0,047 \times CHg \quad (7)$$

где, y – концентрация ртути в ДО;

S – соленость воды;

Fe – концентрация железа;

C – концентрация органических веществ во ВВ;

CHg – концентрация взвешенной ртути в придонном слое воды.

Анализируя уравнение регрессии, необходимо обратить внимание на то, что коэффициент детерминации $R^2 = 0,913$, полученный для найденного уравнения, высокий, при стандартной ошибке оценивания 0,000. Вероятность оценивания составляет $p < 0,05$, соответственно, уравнение статистически значимо. При регрессионном анализе было выявлено, что концентрация растворенного железа играет наиболее важную роль в изменении концентрации взвешенной ртути в воде, т. к. как ее стандартный коэффициент Бета составил наибольшее значение (1,114). Остальные показатели статистически значимо влияют на концентрацию ртути в ДО ($p < 0,05$).

В заключении следует отметить, что полученные уравнения регрессии могут быть успешно использованы на практике в целях прогнозирования концентрации ртути в ДО устьевой области р. Красная.

Таким образом, концентрация общей растворенной ртути в поверхностном слое воды устьевого области р. Красная составляла в среднем $0,04 \pm 0,028$ мкг/л (4 ПДК). В придонном слое содержание растворенной ртути колебалось от 0,005 до 0,12 мкг/л, что было ниже, чем в поверхностном слое. В распределении растворенной ртути наблюдались закономерности: наибольшие значения выявлены в вершине дельты, они уменьшались по направлению к морю. Отмечены положительные корреляции между содержанием растворенной ртути и температурой воды, ХПК, БПК₅, концентрацией железа и отрицательная корреляция с соленостью воды.

Распределение взвешенной формы ртути неравномерно, так, ее концентрация в водотоках постепенно увеличивается по течению и достигает максимума в устье водотоков и зоне маргинального фильтра (0,6–0,7 мкг/л в поверхностном слое и 0,9–1,25 мкг/л в придонном слое), далее, за границей этой зоны, ее концентрация постепенно уменьшается. Миграция ртути в воде устьевого области р. Красная происходит преимущественно во взвешенной форме. Выявлены положительные корреляции между содержанием взвешенной ртути и температурой воды, концентрацией железа, содержанием взвешенных веществ, $C_{орг}$ и отрицательная корреляция с соленостью воды.

В течение исследуемого периода концентрация ртути в ДО водотоков составила в среднем $0,84 \pm 0,12$ мкг/г с.м., а в ДО взморья – $0,94 \pm 0,37$ мкг/г с.м., значения превышают Вьетнамский норматив в 1,68 и 1,34 раза соответственно. Концентрации ртути в поверхностном горизонте ДО ниже, чем в нижнем горизонте, градиент повышения составил 0,016 мкг/см. Концентрация ртути в ДО постепенно увеличивается по направлению к морю и, достигая максимума за границей зоны маргинального фильтра, постепенно уменьшается. Содержание ртути в поверхностном горизонте ДО проявило положительную и достоверную корреляцию с концентрацией железа, с содержанием взвешенной ртути в придонном слое воды и с уровнем органического вещества.

Особенность распределения ртути в системе «вода – ДО» в устьевого области р. Красная заключается в том, что в системе «вода – ДО» ртуть мигрирует

между тремя основными формами: растворенной – взвешенной – ДО, и каждая миграционная форма доминирует на отдельной зоне: растворенная ртуть – на вершине дельты, взвешенная ртуть – в устьях водотоков и зоне маргинального фильтра, ртуть в ДО – на взморье, за границей зоны маргинального фильтра.

ГЛАВА 5 СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ В ГИДРОБИОНТАХ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КРАСНАЯ

5.1 Содержание ртути в различных тканях рыб

После попадания в организм рыб ртуть распределяется и аккумулируется разных органах и тканях. При оценке особенностей аккумуляции ртути в организме рыб в устьевой области р. Красная нами проведены дисперсионный анализ ANOVA значения критерия $p < 0,05$ и HSD-test. Результат дисперсии свидетельствует о том, что значения содержания ртути в различных тканях и органах исследуемых рыб статистически различаются. Вариация содержания ртути в разных тканях и органах рыб в устьевой области р. Красная представлена на рисунке 19.

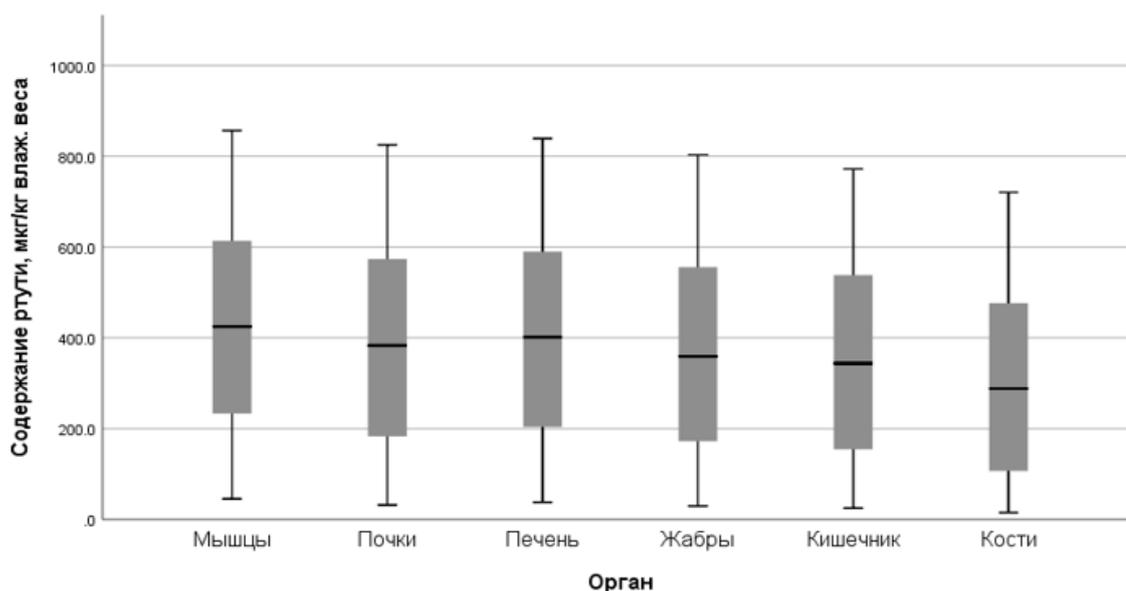


Рисунок 19 – Вариация содержания ртути в разных органах рыб в устьевой области р. Красная

Согласно графику на рисунке 19 распределение ртути в различных тканях и органах рыб в устьевой области р. Красная можно представить в следующем порядке: мышцы > печень > почки > жабры > кишечник > кости.

Разница в содержании ртути в органах и тканях исследуемых рыб объясняется отличиями в способности бионакопления и уровне метаболической

активности органов и тканей [Лукашев, 2009]. Жабры способны более активно аккумулировать формы ртути из воды по сравнению с другими тканями и органами, т. к. растворенные соединения ртути, главным образом метилртуть, активно проникают в организм рыб через капиллярные сосуды, контактирующие с водой. Кроме жабр, накопление ртути другими исследуемыми тканями и органами в большей степени происходит через пищевые пути. Содержание ртути в пищеварительном тракте, а именно в кишечнике небольшое. Это свидетельствует об активном выведении ртути при желчегонном процессе, детоксикации и метилировании ртути в пилорических придатках, а также о высоком уровне накопления ртути в печени рыб [Степанова, 1997]. В костях содержание ртути имеет наименьшее значение по сравнению с другими тканями и органами.

В печени рыб процессы аккумуляции, преобразования, детоксикации и выведения ртути происходят гораздо интенсивнее, чем в других тканях и органах [Моисеенко, 2009], поэтому печень является органом-барьером для распределения ртути по организму рыб. Однако защитные функции печени от проникновения ртути в другие ткани и органы рыб нарушаются при постоянном избыточном её поступлении, в особенности метилртути, из водной среды. В этом случае значительное количество ртути может проникать с кровотоком во все органы и ткани. 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.

В работе М.В. Пастухова и В.И. Гребенщиковой [2008] было предложено использовать соотношение содержания ртути в печени и мышцах рыб в качестве

чувствительного биотеста ртутного загрязнения водных экосистем. В случае соотношения концентраций Hg ($C_{Hg_печень} / C_{Hg_мышцы}$) больше 1 можно утверждать, что в ближайший прошедший временной период имело место поступление значительного количества ртути в водные объекты, а при значении такого соотношения меньше 1 – отсутствие ртутного загрязнения в настоящее время (Рисунок 20).

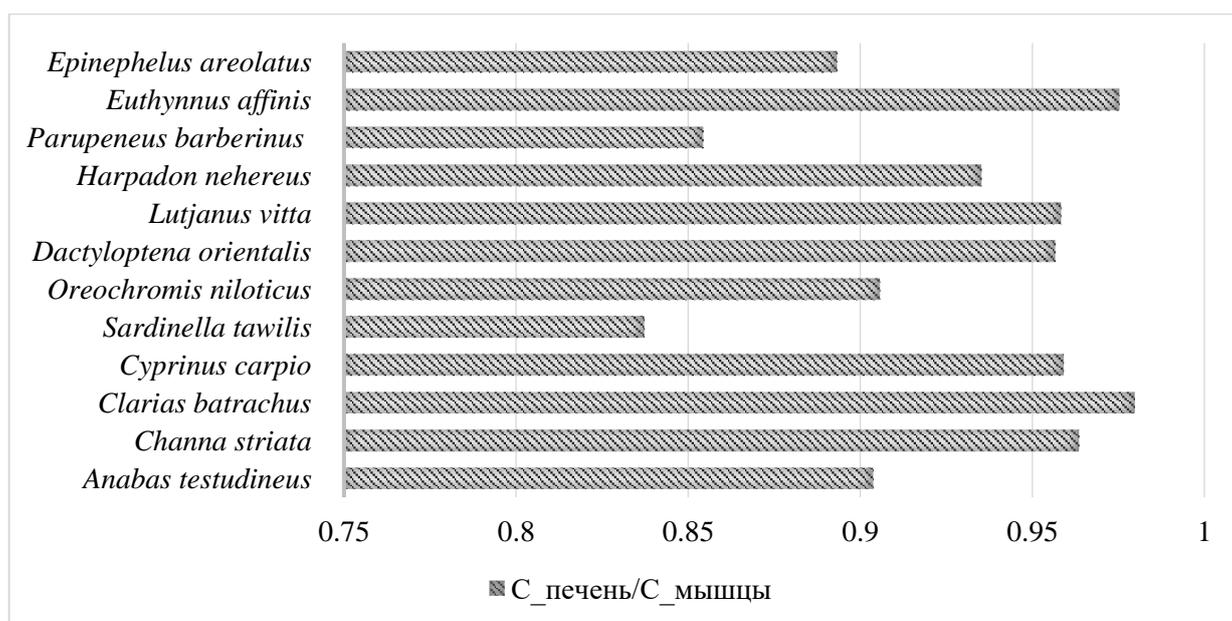


Рисунок 20 – Соотношение содержания ртути в печени и мышцах различных видов рыб в устьевой области р. Красная

Из рисунка 20 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, обнаруженной в воде устьевой области р. Красная, не вызвала острого летального действия для всех пресноводных и морских видов рыб. Не отмечены достоверные изменения выживаемости, роста или размножения, а также морфологической характеристики исследуемых видов рыб в период исследования.

Было определено содержание валовой ртути в мышечной ткани 6 пресноводных (Таблица 7) и 6 морских видов рыб (Таблица 8), обитающих в устьевой области р. Красная.

Таблица 7 – Содержание ртути в мышечной ткани пресноводных рыб, обитающих в устьевой области р. Красная

Вид	<i>n</i>	Масса, г	Длина, см	Hg, мкг/кг
Анабас <i>Anabas testudineus</i>	35	35,05 ± 0,74	18,18 ± 0,82	179,90 ± 12,22
Змееголов <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 ± 2 4,46	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 тилapia <i>Oreochromis niloticus</i>	72	108,32 ± 1,44	15,78 ± 0,56	155,56 ± 8,10

Таблица 8 – Содержание ртути в мышечной ткани морских рыб в устьевой области р. Красная

Вид	<i>n</i>	Масса, г	Длина, см	Hg, мкг/кг
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
Индокееанский 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	836,35 ± 53,22
Желто-белый группер <i>Epinephelus areolatus</i>	24	464,16 ± 22,94	20,24 ± 1,68	369,57 ± 27,13

Минимальные значения среднего содержания ртути в мышечной ткани пресноводных рыб наблюдались у пресноводной сельди (*Sardinella tawilis*) (45,51 ± 3,28 мкг/кг), максимальные – у пресноводного сома (*Clarias batrachus*) (856,54 ± 9,09 мкг/кг). Концентрация ртути в мышечной ткани пресноводного сома (*Clarias batrachus*) и змееголова (*Channa striata*) превышает Вьетнамские санитарно-гигиенические нормы по содержанию ртути в пищевых продуктах (в 1,7 и 1,2 раза соответственно).

При исследовании содержания ртути в мышечной ткани морских видов рыб, выловленных в акватории устьевого взморья и залива Бак Бо, максимальные значения наблюдались у восточного тунца *Euthynnus affinis* ($836,35 \pm 53,22$ мкг/кг); минимальные – в планктофаге (темнополосая зубатая барабуля *Parupeneus barberinus*, $287,23 \pm 11,53$ 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.

Содержание ртути в гидробионтах сильно варьирует в зависимости от географии водных объектов. Средние концентрации ртути в мышечной ткани рыб наблюдались у хариуса в р. Аляска ($0,07\text{--}0,26$ мг/кг), у детритофагов в р. Магдалена (Северная Америка) ($0,2\text{--}1,1$ мг/кг), у рыб в реках Таиланда ($0,05\text{--}0,53$ мг/кг), у рыб Каспийского моря ($0,018\text{--}0,122$ мг/кг) [Olivero, 1998; Чаплыгин, 2016]. При исследовании рыб различных водных объектов Центрального и Южного Вьетнама Н. В. Лобус и его сотрудники [2011] наблюдали, что среднее содержание ртути в мышечной ткани пресноводных рыб варьировало в пределах $0,21\text{--}1,8$ мг/кг, морских рыб – $0,21\text{--}1,07$ мг/кг. Была отмечена закономерность, что среднее содержание ртути в мышечной ткани пресноводных и морских рыб в устьевой области р. Красная ($0,4 \pm 0,01$ мг/кг) существенно выше по сравнению с другими регионами мира, но ниже, чем содержание ртути в мышцах рыб в других водных объектах Центрального и Южного Вьетнама.

В водной экосистеме факторы, влияющие на накопление ртути в организме гидробионтов, относятся к группе как абиотических (физико-химические

параметры водной экосистемы), так и биотических (функциональное состояние организма и показатели структуры сообщества гидробионтов).

К биотическим факторам, способствующим аккумуляции ртути в тканях рыб, следует отнести большой размер и массу, низкий темп роста рыб, высокую продолжительность жизни (Степанова, 2004).

Содержание ртути в мышечной ткани рыб зависит от морфологических параметров, а именно от массы тела рыб (Таблица 9).

Таблица 9 – Коэффициент парной корреляции содержания ртути и массы и длины рыб

Вид	n	Корреляция содержания ртути в мышцах			
		и массы тела		и длины тела	
		r*	p	r	p
Анабас <i>Anabas testudineus</i>	35	0,695**	0,000	0,670**	0,000
Змееголов <i>Channa striata</i>	72	0,314	0,007	0,212	0,074
Пресноводный сом <i>Clarias batrachus</i>	71	0,508**	0,000	0,301	0,011
Сазан <i>Cyprinus carpio</i>	25	0,434	0,030	-0,353	0,084
Пресноводная сельдь <i>Sardinella tawilis</i>	84	0,614**	0,000	0,180	0,134
Нильская тилapia <i>Oreochromis niloticus</i>	72	0,684**	0,000	0,486**	0,000
Восточная летучка <i>Dactyloptena orientalis</i>	25	0,872**	0,000	0,858**	0,000
Красно-коричневый окунь <i>Lutjanus vitta</i>	30	0,705**	0,000	0,758**	0,000
Индоокеанский бомбиль <i>Harpadon nehereus</i>	22	0,611**	0,002	0,564**	0,006
Темнополосая зубатая барабуля <i>Parupeneus barberinus</i>	35	0,911**	0,000	0,922**	0,000
Восточный тунец <i>Euthynnus affinis</i>	22	0,832**	0,000	0,882**	0,000
Желто-белый группер <i>Epinephelus areolatus</i>	24	0,837**	0,000	0,877**	0,000

*r – коэффициент корреляции; p – достоверность; ** зависимость статистически достоверная (при $p < 0,05$).

Содержание ртути в мышечной ткани 4 видов пресноводных рыб (*Anabas testudineus*, *Clarias batrachus*, *Sardinella tawilis* и *Oreochromis niloticus*) ($r = 0,695$; $0,508$; $0,614$ и $0,684$ соответственно, $p < 0,05$) и 6 видов морских рыб ($r = 0,872$; $0,705$; $0,611$; $0,911$; $0,832$ и $0,837$ соответственно, $p < 0,05$) из 12 исследованных видов, обитающих в устьевой области р. Красная, выявило положительную и достоверную корреляцию с массой тела, т. е. для таких видов рыб уровень накопления ртути в мышечной ткани увеличивается при повышении массы тела. Содержание ртути в мышечной ткани змееголова *Channa striata* и сазана *Cyprinus carpio* имеет достоверную, но слабую корреляционную зависимость от массы их тела, т. к. коэффициент корреляции менее $0,5$.

Все исследованные морские рыбы имеют достоверную и положительную корреляционную зависимость между накоплением ртути в мышцах и длиной тела. Среди пресноводных видов рыб такая зависимость прослеживалась у 2 видов (анабас и нильская тилапия).

Помимо межвидовых отличий у всех исследованных видов рыб из устьевой области р. Красная отмечено внутривидовое отличие (для особей, выловленных в среднем и нижнем течениях реки) (Таблица 10).

Как видно из таблицы 10, содержание ртути в мышечной ткани рыб у 5 видов (*Anabas testudineus*, *Clarias batrachus*, *Oreochromis niloticus*, *Cyprinus carpio* и *Sardinella tawilis*), выловленных в нижнем течении реки, больше, чем у этих же видов, но выловленных в среднем течении р. Красная, в $1,26$; $1,15$; $1,05$; $1,05$ и $1,22$ раза соответственно. Данный факт связан с повышением массы и длины тела ихтиообъектов 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.

Таблица 10 – Содержание ртути в мышечной ткани рыб из среднего и нижнего течения р. Красная

Вид	Район обитания	<i>n</i>	Масса, г	Длина, см	Hg, мг/кг
<i>Анабас Anabas testudineus</i>	Среднее течение	15	33,2 ± 1,1	18,2 ± 0,5	175,03 ± 0,05
	Нижнее течение	20	38,7 ± 2,4	19,5 ± 0,4	207,15 ± 0,01
Змееголов <i>Channa striata</i>	Среднее течение	32	115,5 ± 0,2	20,5 ± 0,16	615,01 ± 0,38
	Нижнее течение	40	122,1 ± 0,6	21,8 ± 0,25	538,25 ± 0,27
Пресноводный сом <i>Clarias batrachus</i>	Среднее течение	30	129,4 ± 24,2	22,2 ± 0,5	786,26 ± 6,27
	Нижнее течение	41	185 ± 31,2	25,6 ± 1,2	885,14 ± 2,15
Сазан <i>Cyprinus carpio</i>	Среднее течение	15	578,5 ± 2,8	41,5 ± 1,9	479,02 ± 8,36
	Нижнее течение	20	592,2 ± 5,1	45,2 ± 2,3	495,27 ± 9,21
Пресноводная сельдь <i>Sardinella tawilis</i>	Среднее течение	40	19,2 ± 5,8	9,2 ± 1,5	45,87 ± 1,52
	Нижнее течение	44	24,5 ± 6,1	10,8 ± 1,1	48,02 ± 2,94
Нильская тилапия <i>Oreochromis niloticus</i>	Среднее течение	42	97,2 ± 7,8	12,6 ± 0,5	398,04 ± 1,24
	Нижнее течение	30	132,5 ± 27	17,2 ± 0,6	485,20 ± 2,09

Несколько иная картина наблюдалась у змееголова *Channa striata*: установлена обратная зависимость содержания ртути в мышечной ткани от массы и длины тела, т. е. рыбы, выловленные в нижнем течении, были более крупные и тяжелые, но содержали меньше ртути в мышечной ткани по сравнению с рыбами, выловленными в среднем течении р. Красная. Факторы, преимущественно влияющие на накопление ртути в мышцах этой рыбы, в этом случае представляют темп роста и продолжительность жизни. В нижней части реки высокая концентрация пищевых объектов в воде и ДО приводит к повышению темпа роста хищников. По мнению Н. Т. Комова с соавторами

[2004], низкий темп роста рыб с длинной продолжительностью жизни является причиной аккумуляции ртути в больших количествах, т. е. рыбы с низким темпом роста, но длинной продолжительностью жизни способны аккумулировать ртуть в мышцах сильнее, чем рыбы с высоким темпом роста. Это подтверждается тем, что рыбы в устьевой области р. Красная, а также в различных водных объектах тропических регионов, имеющие более быстрый темп роста, аккумулируют ртуть в меньших количествах, чем в других регионах мира.

Уровень аккумуляции ртути в мышечной ткани рыб в устьевой области р. Красная отражает их пищевую дифференциацию. По типу питания исследуемые виды рыб различались:

- на планктофагов: пресноводная сельдь *Sardinella tawilis*, *Parupeneus barberinus*;
- бентофагов: нильская тиляпия *Oreochromis niloticus*, *Dactyloptena orientalis*;
- хищников: *Cyprinus carpio*, *Channa striata*, *Lutjanus vitta*, *Euthynnus affinis*, *Epinephelus areolatus*, *Harpadon nehereus*;
- эврифагов: *Anabas testudineus*, *Clarias batrachus*.

Группирование видов рыб из р. Красная по трофологическому признаку свидетельствует о зависимости накопления ртути в мышечной ткани от питания (Рисунок 21). По мере увеличения положения вида рыб в трофической цепи происходило достоверное повышение содержания ртути в их мышечной ткани. В исследовании А. G. Heath [2002] отмечено, что концентрация ртути в основной пище рыб располагается в следующем порядке: от фитопланктона, мелких беспозвоночных, крупных беспозвоночных к рыбам. 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 короткой продолжительностью жизни. Питание хищников способствует более интенсивному накоплению ртути, т. к. их пища (мелкие рыбы, беспозвоночные) содержат больше ртути, чем планктон и водные растения. Хищники (*Channa striata*, *Monopterus albus*, *Lutjanus vitta*,

Lutjanus vitta, *Euthynnus affinis*, *Harpadon nehereus*, *Epinephelus areolatus*) пресноводной и морской экосистемы устьевой области р. Красная содержат большее количество ртути в мышечной ткани в 4–13 раз по сравнению с мирными видами рыб.

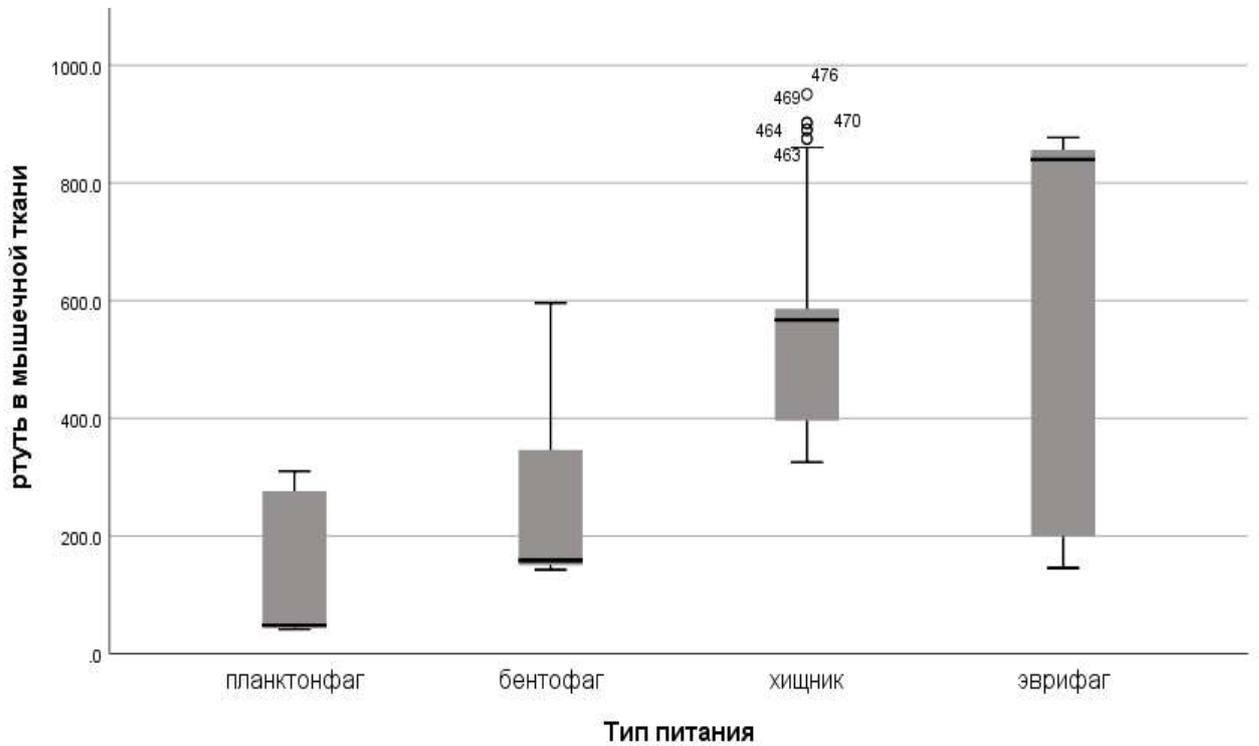


Рисунок 21 – Содержание ртути в мышечной ткани рыб с разным типом питания

На рисунке 21 показано, что наибольшие вариации содержания ртути в мышечной ткани отмечаются у эврифагов, это происходит из-за разнообразия видов их пищи. Кроме того, содержание ртути в мышечной ткани рыб-эврифагов увеличивается с возрастом, потому что эврифаги достаточно большие приходят от питания беспозвоночными на активную добычу мелких рыб.

К абиотическим факторам, способствующим аккумуляции ртути в тканях рыб, относятся параметры воды и концентрация ртути в воде и в ДО. Корреляции между содержанием ртути в мышечной ткани рыб и концентрацией ртути в водной среде представлены в таблице 11 (Таблица 11).

Таблица 11 – Коэффициент парной корреляции содержания ртути и концентрации ртути в водной среде устьевой области р. Красная

Вид	n	Корреляция содержания ртути в мышцах рыб			
		и растворенной ртути		и взвешенной ртути	
		r*	p	r	p
Анабас <i>Anabas testudineus</i>	35	0,802**	0,000	–0,429	0,010
Змееголов <i>Channa striata</i>	72	0,809**	0,000	–0,004	0,974
Пресноводный сом <i>Clarias batrachus</i>	71	0,326	0,000	0,053	0,664
Сазан <i>Cyprinus carpio</i>	25	0,942**	0,000	–0,153	0,467
Пресноводная сельдь <i>Sardinella tawilis</i>	84	0,584**	0,000	–0,057	0,634
Нильская тилapia <i>Oreochromis niloticus</i>	72	0,349	0,000	0,14	0,23
Восточная летучка <i>Dactyloptena orientalis</i>	25	0,217	0,217	0,117	0,577
Красно-коричневый окунь <i>Lutjanus vitta</i>	30	0,717**	0,000	0,607**	0,000
Индокоеанский бомбиль <i>Harpadon nehereus</i>	22	0,872**	0,000	0,746**	0,000
Темнополосая зубатая барабуля <i>Parupeneus barberinus</i>	35	0,885**	0,000	0,523**	0,003
Восточный тунец <i>Euthynnus affinis</i>	22	0,715**	0,000	0,752**	0,000
Желто-белый группер <i>Epinephelus areolatus</i>	24	0,839**	0,000	0,702**	0,000

*r – коэффициент корреляции; p – достоверность; ** зависимость статистически достоверная (при $p < 0,05$).

Содержание ртути в мышечной ткани 4-х видов пресноводных рыб (*Anabas testudineus*, *Channa striata*, *Cyprinus carpio* и *Sardinella tawilis*) ($r = 0,802$; $0,809$; $0,942$ и $0,584$ соответственно, $p < 0,05$) и 5 видов морских рыб (красно-коричневый окунь *Lutjanus vitta*, индокоеанский бомбиль *Harpadon nehereus*, темнополосая зубатая барабуля *Parupeneus barberinus*, восточный тунец *Euthynnus affinis* и желто-белый группер *Epinephelus areolatus*) ($r = 0,714$; $0,872$; $0,885$; $0,715$ и $0,839$ соответственно, $p < 0,05$) из 12 исследованных видов рыб, обитающих в

устьевого области реки Красная, проявляло положительную и достоверную корреляцию с концентрацией растворенной ртути в воде, т. е. для этих видов рыб уровень накопления ртути в мышечной ткани увеличивается при повышении концентрации растворенной ртути в воде.

Содержание ртути в мышечной ткани нильской тиляпии *Oreochromis niloticus* и восточной летучки *Dactyloptena orientalis* не имеет достоверной корреляционной зависимости от концентрации растворенной и взвешенной ртути в воде (коэффициент корреляции менее 0,5, достоверность $p > 0,05$), не имеют достоверной положительной корреляционной зависимости от содержаниями ртути в донных отложениях ($r = 0,782; 0,769$ соответственно, $p < 0,05$). С другой стороны, нильская тиляпия и восточная летучка в экосистеме являются бентофагами. В экосистеме содержание ртути в мышечной ткани рыб-бентофагов не зависит от концентрации растворенной и взвешенной ртути в воде, а увеличивается при повышении содержания ртути в донных отложениях.

Содержание ртути в мышечной ткани морских рыб имеет достоверную и положительную корреляционную зависимость от концентрации взвешенной ртути. Это объясняется увеличением взвешенной ртути в воде и в пище рыб из-за процессов адсорбции ртути на взморье, особенно в зоне маргинального фильтра.

Таким образом, поглощение ртути рыбами зависит от массы их тела, миграционных особенностей, типа питания, их трофического положения в пищевой цепи и содержания ртути в воде и в донных отложениях.

5.2 Содержание ртути в тканях двустворчатых моллюсков

Двустворчатые моллюски являются одним из важных функциональных звеньев гидроэкосистемы, они играют особую роль в миграции и трансформации микроэлементов, в том числе ртути, поскольку представляют наиболее крупные по размеру организмы макрозообентоса, через которые проходят потоки воды с микроэлементами, и далее их отложения аккумулируются в донных осадках [Соловых, 2011].

Для исследования миграции и трансформации ртути в системе «донные отложения – макрозообентос – вода» в устьевой области р. Красная, а также для оценки способности и путей аккумуляции ртути в организме гидробионтов следует рассмотреть содержание и особенности накопления ртути в тканях доминантного (*Meretrix lyrata*) и второстепенного видов двустворчатых моллюсков (*Anadara granosa*, *Austriella corrugata* и *Lutraria rhynchaena*).

Результаты дисперсионного анализа ANOVA содержания ртути (при HSD test ($\alpha = 0,05$)) в некоторых тканях и органах 4-х видов моллюсков показали различное накопление ее в исследованных видах и в их различных тканях и органах (Таблица 12).

Таблица 12 – Содержание ртути в тканях двустворчатых моллюсков

Вид	Длина, мм	Масса тела, г	Содержание ртути, мкг/кг				
			жабры	мантия	гепатопанкреас	тело (нога)	среднее
<i>Meretrix lyrata</i>	40,4±0,6	14,4±0,3	70,8±3,45	73,1 ± 3,5	77,5 ± 3,1	67,1±3,9	72 ± 3,4
<i>Anadara granosa</i>	36,8±0,3	14,2±0,3	105,6±0,7	112,7±1,1	135,3±1,8	103,2±0,8	114,2±0,9
<i>Austriella corrugata</i>	63,5±0,7	85,3±0,2	408,2±1,4	450,9±1,9	468,9±1,6	335±2,4	416,6±1,2
<i>Lutraria rhynchaena</i>	82,7±0,3	67,8 ± 0,1	24,6 ± 0,3	37,2 ± 0,2	37,5 ± 0,3	22,5±0,3	30,5±0,3

Как видно из таблицы 12, 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).

Межвидовые различия концентраций ртути в тканях двустворчатых моллюсков представлены на рисунке 22. Полученные результаты дисперсионного анализа ANOVA иллюстрируют, что среднее содержание ртути у разных видов двустворчатых моллюсков статистически различается ($p < 0,05$). При оценке HSD-

test выявлено, что среднее содержание ртути в организме моллюсков, живущих в устьевой области р. Красная, понижается следующем порядке: *Austriella corrugata* > *Anadara granosa* > *Meretrix lyrata* > *Lutraria rhynchaena* (Рисунок 22).

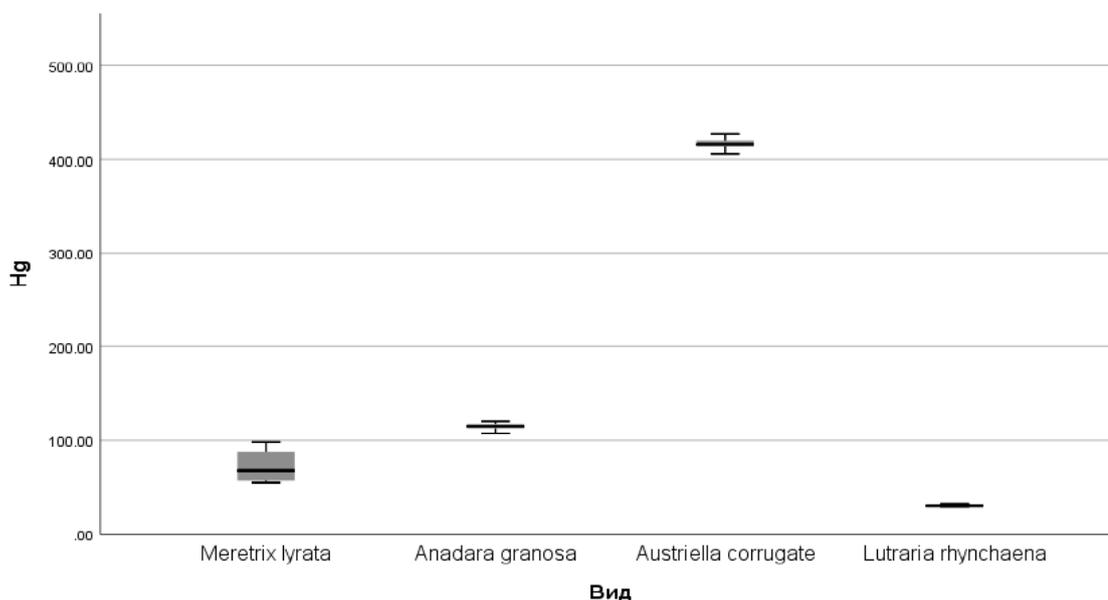


Рисунок 22 – Содержание ртути в двустворчатых моллюсках устьевой области р. Красная

Вариация содержаний ртути в тканях моллюсков связана со способностью ее биологического накопления и с различием в экологических характеристиках, в частности со 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, 2020]. В предыдущей главе описано, что в природном водоеме, где преобладают медленные течения и обильное количество ила в ДО, отмечается высокое содержание ртути по сравнению с песчаными донными осадками и формируются условия, благоприятные для циркуляции природных соединений ртути. Содержание ртути в тканях *Austriella corrugata* превышает ее содержание в *Anadara granosa*, *Meretrix lyrata* и *Lutraria rhynchaena* (302,4; 344,6 и 386,2 мкг/кг соответственно) в 3,6; 5,8 и 13,7 раза.

Помимо межвидовых различий у всех исследованных видов моллюсков наблюдалась вариация содержания ртути в разных органах (Рисунок 23).

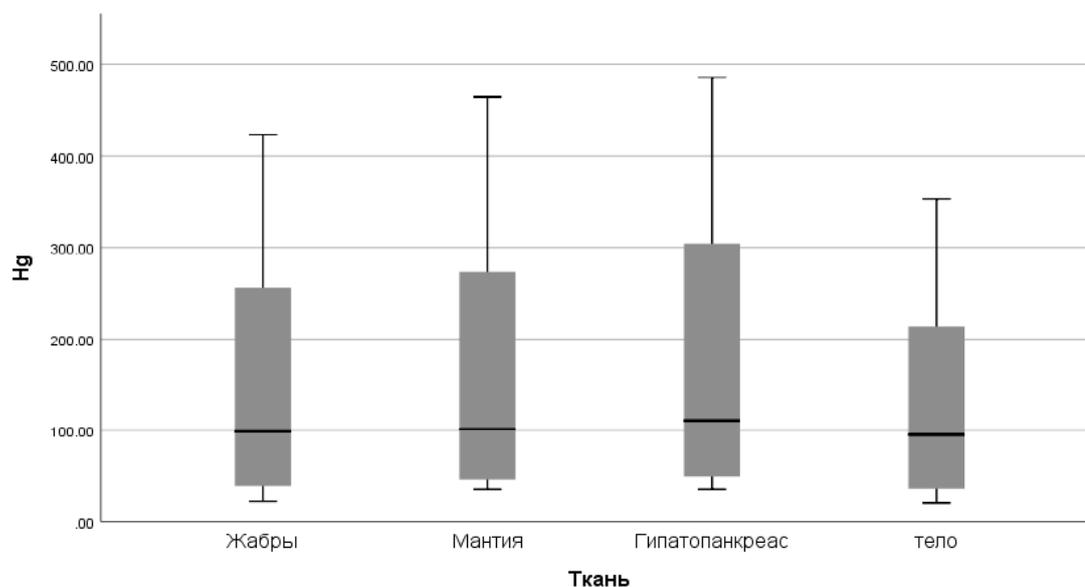


Рисунок 23 – Содержание ртути в разных органах двустворчатых моллюсков устьевого области р. Красная

При дисперсионном анализе ANOVA значение критерия $p < 0,05$, что свидетельствует о том, что дисперсия различаются между концентрациями ртути в различных тканях двустворчатых моллюсков. Полученные результаты оценки HSD-test выявили порядок распределения ртути в различных тканях моллюсков устьевого 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 отличаются повышенным содержанием ртути по сравнению с ее содержанием в теле. Следовательно, депонированием липидов в гепатопанкреасе объясняется максимальное содержание ртути в указанном органе. «Нога» и мантия моллюсков выполняют механическую и защитную функции. Так, в составе 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.

В водной экосистеме факторы, влияющие на накопление ртути в моллюсках, относятся к группе как абиотических (физико-химические параметры водной экосистемы), так и биотических (функциональное состояние организма и показатели структуры сообщества гидробионтов).

К биотическим факторам, способствующим аккумуляции ртути в тканях моллюсков, следует отнести большой размер и массу, низкий темп роста, высокую продолжительность жизни [Степанова, 2004].

Содержание ртути в тканях моллюсков зависит от морфологических параметров, а именно от массы и длины тела (Таблица 13).

Таблица 13 – Коэффициент парной корреляции содержания ртути и массы и длины тела двустворчатых моллюсков

Вид	n	Корреляция содержания ртути в тканях			
		и массы тела		и длины тела	
		r^*	p	r	p
<i>Meretrix lyrata</i>	20	0,83	0,000	0,84	0,000
<i>Anadara granosa</i>	20	0,46	0,04	0,93	0,000
<i>Austriella corrugata</i>	20	0,84	0,000	0,89	0,000
<i>Lutraria rhynchaena</i>	20	0,82	0,000	0,96	0,000

r – коэффициент корреляции; p – достоверность

Как видно из таблицы 13, все корреляции между концентрациями ртути в тканях моллюсков статистически значимы ($p < 0,05$) и имеют прямой характер.

Корреляционные связи между массой и длиной тела и содержанием ртути в тканях 3-х (*Meretrix lyrata*, *Austriella corrugata* и *Lutraria rhynchaena*) из 4-х видов моллюсков, обитающих в устьевой области р. Красная, сильные положительные (r от 0,82 до 0,96; $p < 0,05$). Это свидетельствует о том, что чем больше масса и длина тела моллюсков, тем больше ртути они накапливают в тканях.

Содержание ртути в тканях *Anadara granosa* имеет сильную прямую корреляционную связь с длиной, но слабую с массой ($r = 0,46$; $p < 0,05$).

На следующем этапе работы было исследовано влияние среды обитания на накопление ртути в тканях двустворчатых моллюсков.

Многолетняя динамика содержания ртути, как и других тяжелых металлов, в двустворчатых моллюсках-бентофагах отражала динамику содержания ртути в донных отложениях и в придонном слое воды. По результатам статистического анализа были выявлены линейные зависимости между содержанием ртути в двустворчатых моллюсках и ее концентрациями во взвешенной форме придонного слоя воды (Рисунок 24).

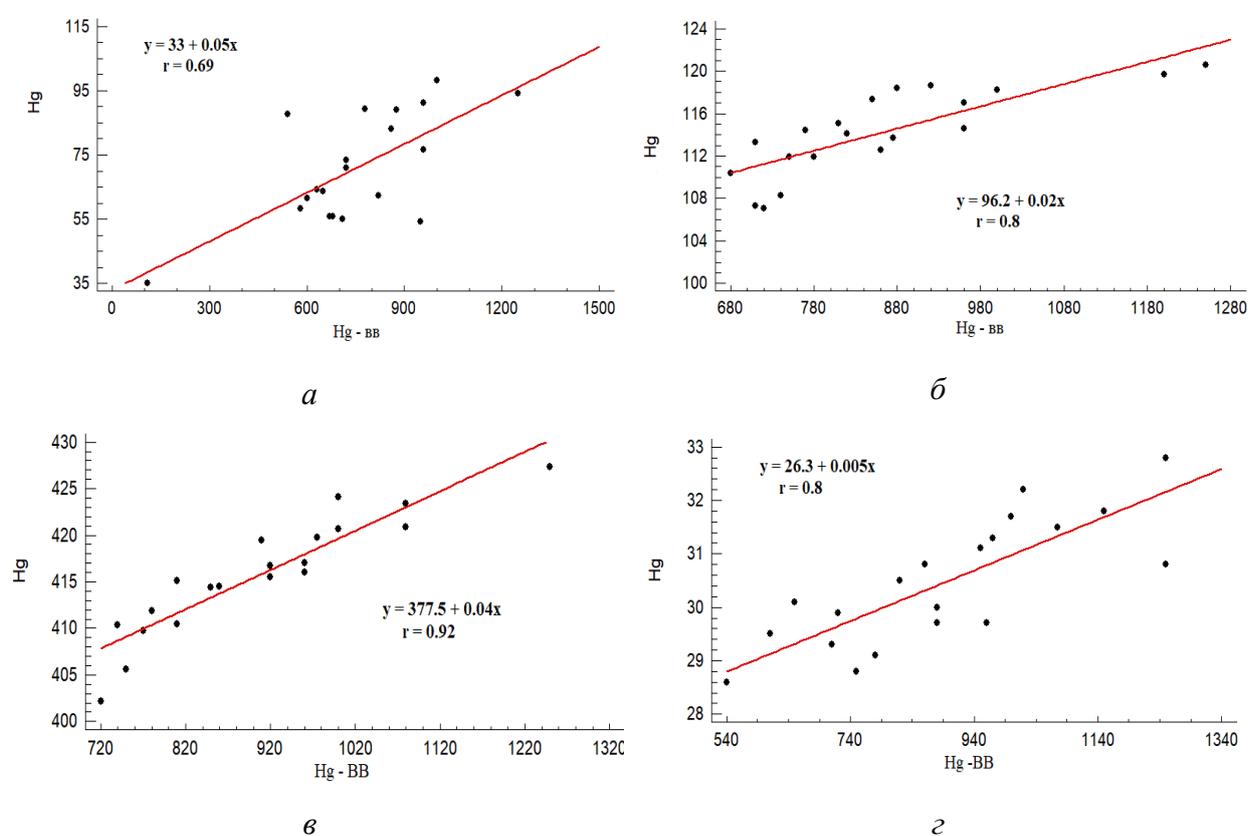


Рисунок 24 – Зависимость содержания ртути в тканях моллюсков от концентрации ее взвешенной формы в придонном слое воды: *a* – *Meretrix lyrata*; *б* – *Anadara granosa*; *в* – *Austriella corrugata*; *г* – *Lutraria rhynchaena*

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить, что корреляция между концентрацией взвешенной ртути в придонном слое воды и ее концентрацией в тканях моллюсков прямая, достоверная ($r = 0,69-0,92$, $p < 0,05$).

При высоком содержании взвешенной ртути в воде повышается процесс аккумуляции ртути через жабры, а также увеличивается концентрация ртути в пище моллюсков, а значит, повышается ее содержание в тканях моллюсков. Наиболее сильной корреляционной зависимостью является зависимость между содержанием ртути в *Austriella corrugata* и взвешенной формой придонного слоя воды ($r = 0,92, p < 0,05$).

На рисунке 25 представлены корреляционные зависимости между содержанием ртути в поверхностном горизонте донных отложений и ее концентрациями в тканях моллюсков устьевой области р. Красная (Рисунок 25).

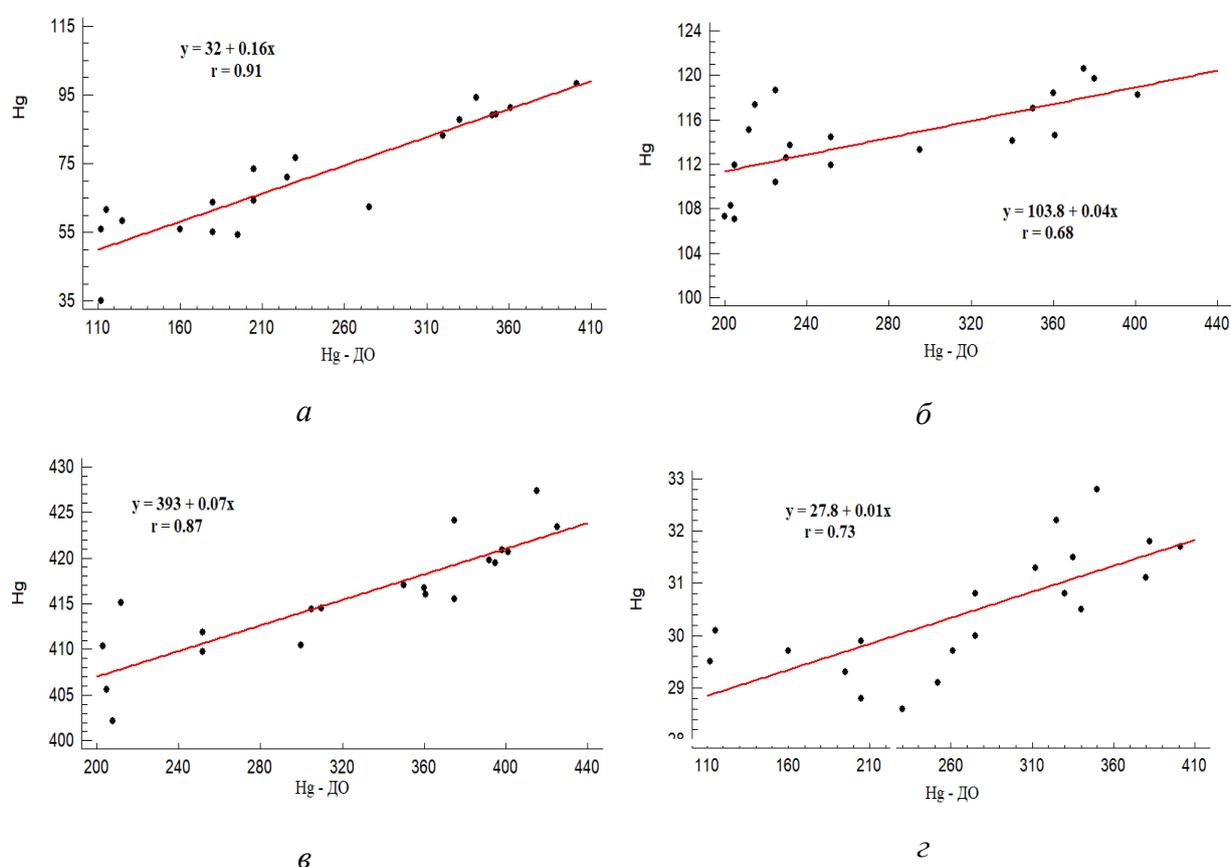


Рисунок 25 – Зависимости содержания ртути в тканях моллюсков от ее концентрации в донных отложениях: а – *Meretrix lyrata*; б – *Anadara granosa*; в – *Austriella corrugata*; г – *Lutraria rhynchaena*

Как видно из рисунка 25, коэффициенты корреляции между концентрациями ртути в тканях моллюсков и ее концентрациями в донных отложениях были высокие, положительные и достоверные (r от 0,68 до 0,91, $p <$

0,05), что свидетельствует о сильной прямой корреляционной связи между этими параметрами. Наиболее сильной связью является зависимость между содержанием ртути в *Meretrix lyrata* и ее концентрацией в донных отложениях ($r = 0,91, p < 0,05$). Такие зависимости указывают на влияние концентрации ртути в донных отложениях на ее содержание в тканях моллюсков, т. е. чем больше содержания ртути в поверхностном горизонте донных отложений, тем больше ее содержание в тканях моллюсков.

При исследовании корреляции не выявлено статистически значимых зависимостей между содержанием растворенной формы ртути в воде и ее концентрациями в тканях моллюсков. Данное явление позволяет сделать вывод о том, что процесс аккумуляции ртути в моллюсках не зависит от концентрации растворенных соединений ртути в воде, а преимущественно влияют фильтрация взвешенных частиц ртути через жабры и накопление ртути из пищи через кишечники.

Коэффициент биологического накопления (K_d) характеризует степень накопления ртути моллюсками [Хажеева, 2005; Минакова, 2011;], результаты расчета которого представлены в таблице 14 (Таблица 14).

Как видно из таблицы 14, ртуть неодинаково накапливается в различных тканях. Наибольшее значение коэффициента накопления взвешенной ртути и ртути в ДО отмечено для гепатопанкреаса, наименьшее – для ноги. Понижение таких значений коэффициента представлено в убывающем порядке: $K_{a(г-п)} > K_{a(м)} > K_{a(ж)} > K_{a(нога)}$.

Самую высокую степень бионакопления ртути взвешенной и в ДО имеет *Austriella corrugata* ($K_a = 472,08$; $K_d = 2,42$), а самый низкий – *Lutraria rhynchaena* ($K_a = 34,68$; $K_d = 0,18$). Значение коэффициента накопления ртути тканями исследуемых двустворчатых моллюсков иллюстрирует распределение содержания ртути в их тканях.

Представленные в таблице 14 данные указывают на то, что все коэффициенты $K_a > 2$, т. е. все 4 вида исследуемых моллюсков являются

макроконцентраторами и, соответственно, имеют высокую биологическую доступность ртути с водой.

Таблица 14 – Значения коэффициентов накопления для некоторых тканей двустворчатых моллюсков устьевой области р. Красная

Вид моллюсков	Ткани моллюсков	Коэффициент накопления	
		взвешенной ртути в воде $Kd_{(вода)}$	ртути в донных отложениях $Kd_{(ДО)}$
<i>Meretrix lyrata</i>	жабры	109,2	0,4
	мантия	111,5	0,42
	гепатопанкреас	115,8	0,45
	тело (нога)	107,8	0,37
	все	111,08	0,41
<i>Anadara granosa</i>	жабры	118,9	0,6
	мантия	127,5	0,64
	гепатопанкреас	154,2	0,76
	тело (нога)	117,5	0,58
	все	129,53	0,65
<i>Austriella corrugata</i>	жабры	465,2	2,42
	мантия	510,5	2,6
	гепатопанкреас	532,5	2,72
	тело (нога)	380,1	1,95
	все	472,08	2,42
<i>Lutraria rhynchaena</i>	жабры	27,8	0,14
	мантия	42,5	0,22
	гепатопанкреас	42,6	0,22
	тело (нога)	25,8	0,13
	все	34,68	0,18

Значения коэффициента биологического накопления ртути в ДО во много раз меньше, чем значения $Kd_{(вода)}$, соответственно, способность аккумуляции ртути из донных отложений моллюсками снижена. Три вида моллюсков (*Meretrix lyrata*, *Anadara granosa* и *Lutraria rhynchaena*) выступают как деконцентраторы ($K_d < 1$). «Нога» *Austriella corrugata* является микроконцентратором ($1 < K_d < 2$), а *Austriella corrugata* – макроконцентратором ($K_d > 2$), т. е. этот вид моллюска способен интенсивно аккумулировать ртуть не только из водной фазы, но и из донных отложений.

Регрессионное уравнение, характеризующее форму связи между концентрацией ртути в тканях моллюсков и концентрацией ее взвешенной формы, имеет вид:

$$y = -58,221 + 0,41 \times m + 29,676 \times \text{CHgs} + 0,954 \times \text{Ks} \quad (9)$$

где, y – концентрация ртути в тканях моллюсков;

m – масса тела моллюсков;

CHgs – концентрация взвешенной ртути в придонном слое воды;

Ks – коэффициент накопления взвешенной ртути.

Анализируя полученное уравнение регрессии, необходимо обратить внимание на то, что коэффициент детерминации $R^2 = 0,995$, полученный для найденного уравнения, высокий, при стандартной ошибке оценивания 0,000. Вероятность оценивания составляет $p < 0,05$, соответственно, уравнение статистически значимо. Все показатели статистически значимо влияют на концентрацию ртути в тканях моллюсков ($p < 0,05$).

Уравнение регрессии, характеризующее форму связи между концентрацией ртути в тканях моллюсков и ее концентрацией в ДО, имеет вид:

$$y = -21,319 - 0,105 \times m + 28,174 \times \text{CHgb} + 172,992 \times \text{Kb} \quad (10)$$

где, y – концентрация ртути в тканях моллюсков;

m – масса тела моллюсков;

CHgb – концентрация ртути в поверхностном горизонте ДО;

Kb – коэффициент накопления ртути в ДО.

При оценке уравнения регрессии было отмечено, что коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$, полученный для найденного уравнения, высокий, при стандартной ошибке оценивания 0,000. Вероятность оценивания составляет $p < 0,05$, соответственно, уравнение статистически значимо. Все показатели статистически значимо влияют на концентрацию ртути в тканях моллюсков ($p < 0,05$).

В заключение следует отметить, что полученные два уравнения регрессии могут быть успешно использованы на практике в целях прогнозирования

концентрации ртути в тканях двустворчатых моллюсков в устьевой области реки Красная.

5.3 Биоаккумуляция ртути в трофической цепи устьевой области реки Красная

Средние концентрации ртути в различных компонентах экосистем устьевой области р. Красная представлены в таблице 15 (Таблица 15).

Таблица 15 – Средние концентрации ртути в абиотических и биотических компонентах гидроэкосистем устьевой области р. Красная

Водный объект	Содержание ртути						
	Вода, мг/л	ДО, мг/кг	Зообентос, мг/кг	Фитопланктон, мг/кг	Зоопланктон, мг/кг	Молодь рыб, мг/кг	Хищник, мг/кг
Пресноводные	0,000067	0,65	0,152	0,06	0,108	0,145	0,578
Зона маргинального фильтра	0,00005	0,98	0,145	0,052	0,104	0,125	0,65
Взморье	0,000017	0,75	0,175	0,054	0,118	0,153	0,84

При оценке биоаккумуляции ртути в трофической цепи автором рассчитаны коэффициенты биологического накопления, выражающие отношение содержания ртути в организме и ее концентрации в воде (K_a) и в донных отложениях (K_d), а также коэффициенты биомагнификации (K_b).

Следует отметить, что в зоне маргинального фильтра, в пресноводной и морской экосистемах устьевой области р. Красная имеют аналогичные пищевые цепи:

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

Разные экосистемы устьевой области р. Красная различаются гидролого-гидрохимическими характеристиками, видовой структурой и пищевыми рационами каждого звена трофической цепи, в связи с чем для оценки биоаккумуляции гидробионтами каждого звена пищевой цепи использовались средние коэффициенты бионакопления и биомагнификации, рассчитанные усредненные данные по содержанию ртути в пробах фитопланктона, зоопланктона, зообентоса и в мышечных тканях рыб доминантных видов из пресноводной экосистемы (Рисунок 26), экосистеме зоны маргинального фильтра (Рисунок 27) и морской экосистем (Рисунок 28) устьевой области р. Красная.

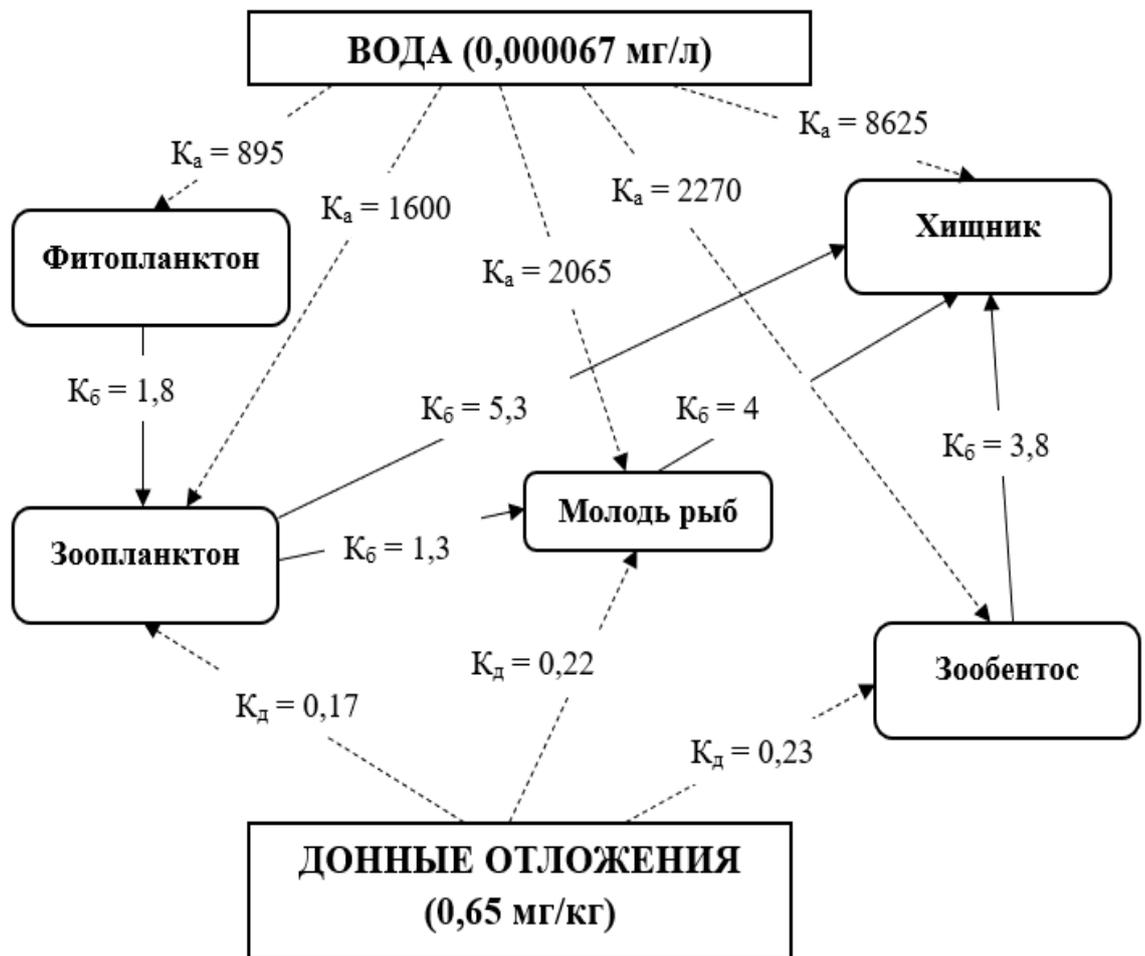


Рисунок 26 – Бионакопление и биомагнификация ртути в пищевых цепях в пресноводной экосистеме устьевой области р. Красная

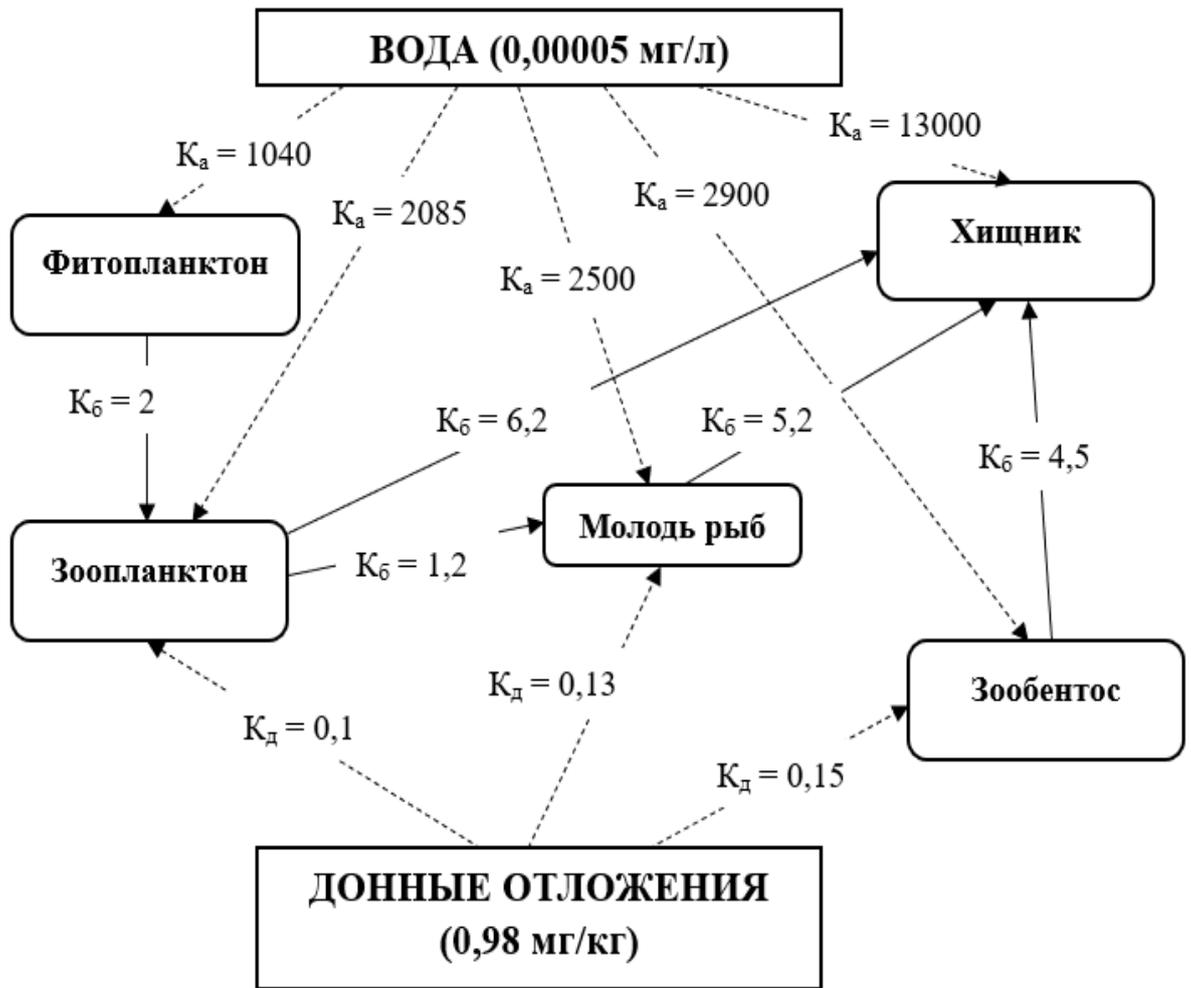


Рисунок 27 – Бионакопление и биомагнификация ртути в пищевых цепях в экосистеме зоны маргинального фильтра устьевой области реки Красная

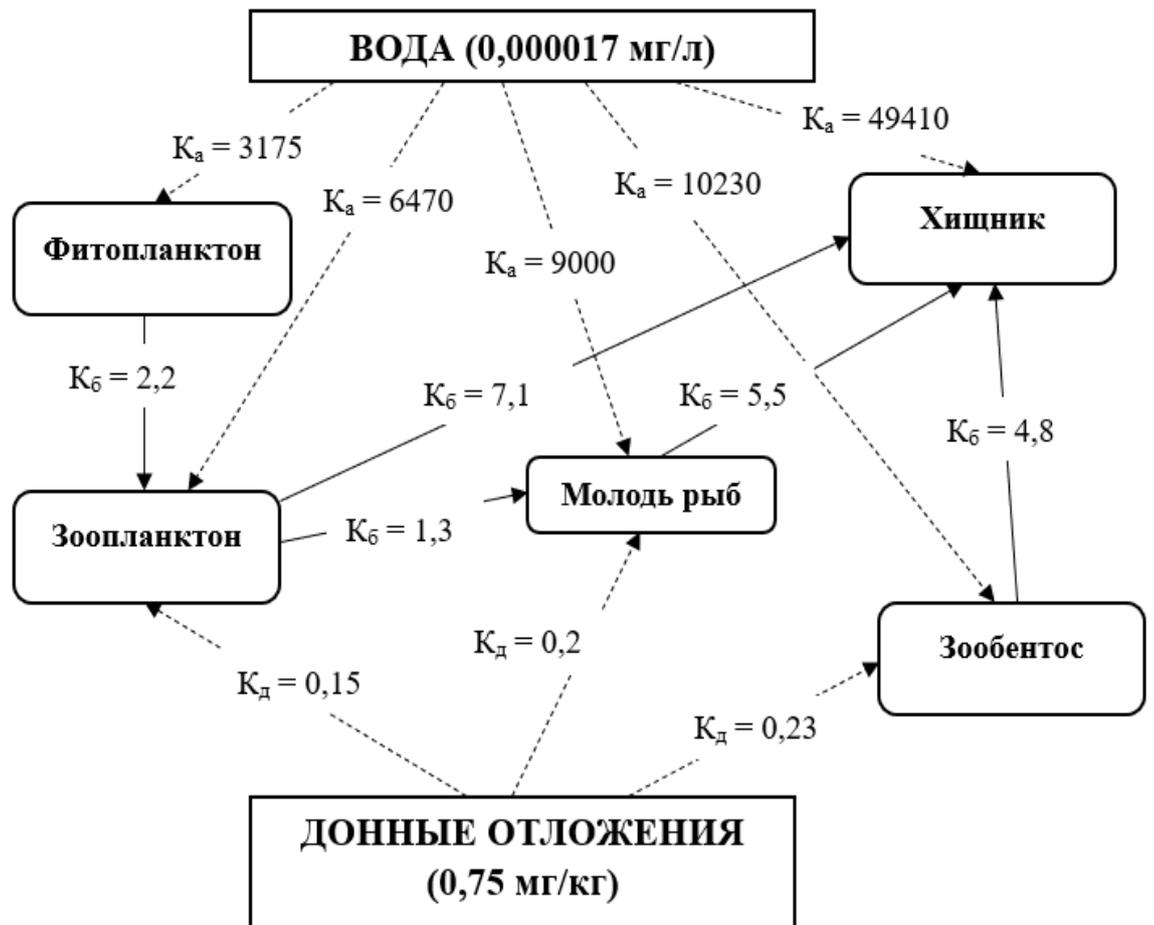


Рисунок 28 – Бионакопление и биомагнификация ртути в пищевых цепях в морской экосистеме устьевой области р. Красная

На рисунках 26, 27 и 28 видно, что все исследуемые гидробионты разных экосистем в разной степени концентрируют в своих организмах ртуть из водной среды. На всех пищевых цепях фитопланктон, занимающий на первичном звене, аккумулирует ртуть только из воды. Он играет наиболее важную роль в накоплении ртути из водной среды и передаче на более высокие трофические уровни. Таким образом, именно фитопланктон, обладающий огромной биомассой, имеет решающее значение в поступлении ртути в пищевые цепи гидробионтов. Полученные коэффициенты бионакопления ртути фитопланктоном в зоне маргинального фильтра и в морской экосистеме были в 1,2 и 3,5 раза, соответственно, выше этого показателя для пресноводной среды. Еще раз отметим, что фитопланктон только пассивно плавает с течением воды, в то время

как планктонные водоросли накапливают ртуть в течение всей своей непродолжительной жизни и служат прекрасным биоиндикатором ртутного загрязнения водной среды в ближайший временной период.

В других звеньях пищевой цепи морской экосистемы и зоны маргинального фильтра коэффициенты бионакопления ртути также были заметно выше, чем в пресноводной: в зоопланктоне – в 1,3–4 раза, в молоди рыб – в 1,2–4,4 раза, в хищниках – в 1,5–5,7 раза соответственно. 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, ДО, но и в значительной степени алиментарным путем.

Таким образом, содержание ртути в различных тканях и органах рыб представлено в следующем порядке: мышцы > печень > почки > жабры > кишечник > кости. Среднее содержание ртути в мышечной ткани рыб в устьевой области р. Красная варьирует в пределах от $856,54 \pm 9,09$ мкг/кг у пресноводного сома (*Clarias batrachus*) до $45,51 \pm 3,28$ мкг/кг у пресноводной сельди (*Sardinella tawilis*). Превышение Вьетнамских санитарно-гигиенических норм по содержанию ртути в пищевых продуктах наблюдалось у пресноводного сома (*Clarias batrachus*), змееголова (*Channa striata*), восточного тунца (*Euthynnus affinis*), красно-коричневого окуня (*Lutjanus vitta*) и у восточной летучки

Dactyloptena orientalis (превышение в 1,7; 1,2; 1,8; 1,3 и 1,1 раза соответственно). Содержание ртути в мышечной ткани рыб имеет достоверные положительные корреляции с массой, длиной тела, а также с концентрациями растворенной и взвешенной ртути в воде. Образ жизни хищников способствует более интенсивному накоплению ртути в мышечной ткани, наибольшие вариации содержания ртути в мышечной ткани отмечаются у эврифагов из-за разнообразия видов их пищи.

Ртуть обнаружена во всех тканях исследуемых видов двустворчатых моллюсков в устьевой области р. Красная. Содержание ртути в моллюсках представляется в следующем порядке: гепатопанкреас > мантия > жабры > тело (нога).

Содержание ртути в тканях двустворчатых моллюсков достоверно и напрямую зависит от их массы и длины тела. Выявлены достоверные и положительные корреляционные связи между содержанием ртути в тканях моллюсков и содержанием взвешенной формы ртути в придонном слое воды и в донных отложениях.

Austriella corrugata – макроконцентратор, т. е. такой вид моллюска способен интенсивно аккумулировать ртуть не только из водной фазы, но и из донных отложений. Остальные исследуемые виды гидробионтов имеют низкие значения коэффициента бионакопления ртути из донных отложений, но высокую биологическую доступность растворенной и взвешенной ртути с водой.

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, ДО, но и в значительной степени алиментарным путем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В устьевой области р. Красная (Вьетнам) существуют как местные источники ртути – промышленные предприятия, сжигание и размещение отходов, сточные воды, – так и региональные и глобальные эмиссии ртути (из Европы, Америки и Северной Азии). В настоящее время ртутное загрязнение рассматривается как актуальная проблема устьевой области р. Красная. Исследованные в работе закономерности и особенности миграции разнообразных форм ртути в системе «вода – донные отложения – гидробионты» могут являться основой для экологического мониторинга загрязнения ртутью устьевой области р. Красная.

Гидролого-гидрохимические показатели воды варьировали по сезонам года. В летнее половодье такие значения, как температура воды, рН, концентрация биогенов, минеральных соединений и загрязнителей, были выше, чем в зимнюю межень.

В результате исследований вьетнамских и иностранных ученых [Кы, 2004; Sao Thi Thu Trang, 2009; Михайлов, 2012] было установлено, что устьевая область р. Красная характеризовалась высокой концентрацией взвешенных веществ в воде. Мелкие взвешенные наносы, имеющие преимущественно красноватый цвет, образуют естественные фоновые значения цветности речных вод, что послужило основанием для названия реки: «Hong» (в переводе с вьетнамского означает красный цвет). Полученные нами результаты вновь подтвердили данную характеристику. По течению водотоков устьевой области р. Красная концентрация взвешенных веществ повышалась по направлению к морю и достигала максимума в устье Балат ($113 \pm 6,2$ мг/л), а за границами зоны маргинального фильтра, наоборот, происходило снижение концентрации взвешенных веществ. Распределение концентрации взвешенного органического углерода сходно с распределением концентрации взвешенных веществ, максимальные концентрации которого ($2,83 \pm 0,01$ мг/л) приходились на участок Балат (место наиболее приближено к устью р. Красная). Увеличение

концентрации органического углерода здесь обусловлено интенсивным осаждением речных взвешенных веществ, обогащенных терригенным органическим веществом, а также развитием здесь фитопланктонного сообщества, обеспечивающего дополнительную поставку планктоногенного органического углерода. Далее концентрации C_v в воде резко уменьшаются со значительными градиентами и достигают значений 0,2–0,85 мг/л.

Концентрация общей растворенной ртути в поверхностном слое воды устьевой области р. Красная составляла в среднем $0,04 \pm 0,028$ мкг/л, что превышало ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения в 4 раза. В придонном слое содержание растворенной ртути колебалось в пределах от 0,005 до 0,12 мкг/л, что ниже, чем в поверхностном слое. Распределение растворенной ртути наблюдается по следующей выявленной закономерности: наибольшие значения идентифицированы на вершине дельты, они уменьшаются по направлению к морю. Отмечены положительные корреляции между содержанием растворенной ртути и температурой воды, ХПК, БПК₅, концентрацией железа; обнаружена отрицательная корреляция с соленостью воды.

Распределение взвешенной формы ртути неравномерно. Так, ее концентрация в водотоках постепенно увеличивается по течению и достигает максимума в устье водотоков и в зоне маргинального фильтра (0,6–0,7 мкг/л в поверхностном слое и 0,9–1,25 мкг/л в придонном слое), далее, за границей этой зоны, ее концентрация постепенно уменьшается. В воде устьевой области р. Красная от 2 до 63 % ртути мигрирует в растворенной форме, т. е. миграция ртути в воде устьевой области реки происходит преимущественно во взвешенной форме. Выявлены положительные корреляции между содержанием взвешенной формы ртути и температурой воды, концентрацией железа, содержанием взвешенных веществ, C_{org} и отрицательная корреляция с соленостью воды.

В течение исследуемого периода концентрация ртути в ДО водотоков составила в среднем $0,84 \pm 0,12$ мкг/г с.м., что превышает Вьетнамский норматив в 1,68 раза, а в ДО взморья – $0,94 \pm 0,37$ мкг/г с.м., что превышает Вьетнамский

норматив в 1,34 раза. Концентрация ртути в поверхностном горизонте ДО меньше, чем в нижнем горизонте, градиент повышения составил 0,016 мкг/см. Концентрация ртути в ДО постепенно увеличивается по направлению к морю, достигая максимума за границей зоны маргинального фильтра, затем постепенно уменьшается. Содержание ртути в поверхностном горизонте ДО проявило положительную и достоверную корреляцию с концентрацией железа, с содержанием взвешенной ртути в придонном слое воды и с уровнем органического вещества.

Полученные нами закономерности миграции ртути в воде и донных отложениях устьевой области р. Красная выявили картину, аналогичную распределению ртути в различных устьевых областях рек Северного Вьетнама [Le Thi Vinh, 1998; Le Xuan Sinh, 2018]. В течение исследуемого периода было выявлено, что растворенная ртуть доминировала на вершине дельты р. Красная, взвешенная ртуть – в устьях водотоков и в зоне маргинального фильтра, а ртуть в донных отложениях – на взморье, за границами зоны маргинального фильтра. Кроме того, полученные максимальные концентрации ртути в растворенной, взвешенной формах и донных отложениях устьевой области р. Красная выше, чем в других акваториях Вьетнама. Это являлось доказательством глобальной эмиссии ртути в устьевой области р. Красная. По сравнению с другими водотоками, р. Красная протекает не только по территории Вьетнама, но также на юге Китая, где сосредоточены большие промышленные и населенные центры. Кроме того, устьевая область р. Красная оказывается под воздействием восточно-северных ветров зимой и муссонов, т. е. эмиссии ртути в исследуемой области, возможно, связаны с распространением их из Китая, Японии и других стран Северного полушария Земли.

Содержание ртути в различных тканях и органах рыб представлено в следующем порядке: мышцы > печень > почки > жабры > кишечник > кости. 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.

Следует отметить, что превышение Вьетнамских санитарно-гигиенических норм по содержанию ртути в пищевых продуктах наблюдались в пресноводном соме (*Clarias batrachus*), змееголове (*Channa striata*), восточном тунце (*Euthynnus affinis*), красно-коричневом окуне (*Lutjanus vitta*) и в восточной летучке (*Dactyloptena orientalis*) (превышение в 1,7; 1,2; 1,8; 1,3 и 1,1 раза соответственно).

В устьевой области р. Красная максимальные значения средних концентраций ртути ($416,6 \pm 1,2$ мкг/кг) отмечены у *Austriella corrugate*, минимальные ($30,5 \pm 1,2$ мкг/кг) – у *Lutraria rhynchaena*. Во всех тканях двустворчатых моллюсков не наблюдалось превышение Вьетнамских санитарно-гигиенических норм по содержанию ртути в пищевых продуктах. Содержание ртути в моллюсках разных видов представлено в следующем порядке: *Austriella corrugata* > *Anadara granosa* > *Meretrix lyrata* > *Lutraria rhynchaena*. Распределение поллютанта по разным органам моллюсков имело следующий вид: гепатопанкреас > мантия > жабры > тело (нога).

В ходе анализа факторов, определяющих накопление ртути гидробионтами, нами были установлены статистически значимые прямые корреляционные зависимости содержания поллютанта в мышечной ткани рыб, тканях моллюсков от их массы и длины тела, а также от концентрации ртути в водной среде. К биотическим факторам относятся тип питания и уровень бионакопления ртути гидробионтами. Хищнический образ жизни способствует более интенсивному накоплению ртути в мышечной ткани, наибольшие вариации содержания ртути в мышечной ткани отмечаются у эврифагов из-за разнообразия видов их пищи. *Austriella corrugata* выступает как макроконцентратором, т. е. такой вид моллюска способен интенсивно аккумулировать ртуть не только из водной фазы, но и из донных отложений. Остальные исследуемые виды гидробионтов имеют высокую биологическую доступность растворенной и взвешенной ртути с водой.

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, ДО, но и в значительной степени алиментарным путем.

В результате статистической обработки были выведены регрессионные уравнения, которые характеризуют форму связи между концентрациями ртути в воде, в ДО, в тканях двустворчатых моллюсков и различными показателями водной среды. Полученные уравнения регрессии могут быть успешно использованы на практике в целях прогнозирования концентрации ртути в устьевой области р. Красная.

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 ртути в устьевой области реки 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 реки Красная и определить возможности применения каждого вида гидробионтов как биоиндикаторы 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 corrugate*); 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:

- Дальнейшее совершенствование районирование загрязнения ртути в устьевой области реки Красная;
- Дальнейшее совершенствование моделей, описывающих процессы распределение ртути в экосистемах, а также пути использование 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

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 превышение 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 двустворчатых 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 Сор_г ($r= 0,644; 0,85; 0,533; 0,863$). Содержание ртути в поверхностном горизонте донных отложений положительно и достоверно коррелировало с концентрацией железа, Сор_г 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 $0,92$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алёхина, Г.П.** Влияние поллютантов различной химической природы на микрофлору внутренних органов двустворчатого моллюска *Unio pictorum* / Г.П. Алёхина, И.А. Мисетов. – Текст : непосредственный // Вестник ОГУ. – 2012. – №10 (146). – С. 58-60.

2. **Аникиев, В.В.** Поведение тяжелых металлов при смешении речных и морских вод / В.В. Аникиев, Н.А. Горячев. – Текст : непосредственный // Геохимия. – 1991. – №7. – С. 1642-1651.

3. **Будников, Г.К.** Тяжёлые металлы в экологическом мониторинге водных систем / Г.К. Будников. – Текст : непосредственный // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №5. – С. 23-29.

4. **Варшал, Г.М.** Комплексообразование ртути с гумусовыми кислотами как важнейший этап цикла ртути в биосфере / Г.М. Варшал, Г.М. Кощеева, С.Д. Хушвахтова, Т.К. Велюханова [и др.]. – Текст : непосредственный // Геохимия. – 1999. – № 3. – С. 269-275.

5. **Воробьев, В.И.** Биогенная миграция тяжелых металлов в организме русского осетра (*Acipenser guldenstadti* Brandt): монография / Воробьев В.И., Зайцев В.Ф., Щербакова Е.Н. – Астрахань: ООО «ЦНТЭП». – 2007. – 116 с. – ISBN 978-5-89388-086-1. – Текст : непосредственный.

6. **Геология, полезные ископаемые и геоэкология Северо-Запада России:** сборник материалов XVII молодежной научной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца (9 – 12 октября 2006) / редкол.: А.И. Голубев, Т.С. Матвеева, А.В. Степанова. – Петрозаводск, 2006. – 246 с. – ISBN: 5-9274-2245-3. – Текст : непосредственный.

7. **Голованова, И.Л.** Влияние ртути на гидролиз углеводов в кишечнике речного окуня *Perca fluviatilis* / И.Л. Голованова, В.Т. Комов. – Текст : непосредственный // Вопросы ихтиологии. – 2005. – Т. 45. – №5. – С. 695-701.

8. **Гордеев, В.В.** Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер / В.В. Гордеев, А.П. Лисицын. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5. – С. 721 – 744.

9. **ГОСТ 17.1.5.01-80** Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность (с Изменением N 1). – М.: ИПК издательство Стандартов, 2002. – 7с. – Текст : непосредственный

10. **ГОСТ Р 59024-2020.** Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2023. – 17с. – Текст : непосредственный

11. **Гремячих, В.А.** Закономерности накопления соединений ртути планктонными ракообразными *Cerioda phniaaffinis* / В.А. Гремячих, И.И. Томилина. – Текст : непосредственный // Гидробиологический журнал сер. Водная токсикология. – 2010. – Т. 46. – №4. – С. 63-74.

12. **Гремячих, В.А.** Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX–XXI веков / В.А. Гремячих, Р.А. Ложкина, В.Т. Комов. – Текст : непосредственный // Трансформация экосистем. – 2019. – №2. – С. 85 – 95.

13. **Давыдова, О.А.** Влияние физико-химических факторов на содержание тяжелых металлов в водных экосистемах: монография / О.А. Давыдова, Е.С. Климов, Е.С. Ваганова, А.С. Ваганов; под науч. ред. Е.С. Климова. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 167 с. – ISBN 978-5-9795-1343-0.– Текст : непосредственный.

14. **Дымникова, О.В.** Проблемы обращения с ртутьсодержащими отходами / О.В. Дымникова, Ю.Р. Зарипова, Т.С. Воскобойник. – Текст : непосредственный // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2012. – №5 (66). – С. 10-18.

15. **Исупова, М.В.** Гидрологические процессы в устьевой области р. Хонгха (Красная) / М.В. Исупова, В.Н. Михайлов. – Текст : непосредственный // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 5. – С. 524–537.

16. **Ковековдова, Л.Т.** Токсичные элементы в промысловых гидробионтах прибрежных акваторий северо-западной части Японского моря / Л.Т.

Ковековдова. – Текст : непосредственный // Вопросы рыболовства. – 2006. – Т. 7. – № 1(25). – С. 185 – 189.

17. **Колесник, О.Н.** Особенности химического и минерального состава железо-марганцевых конкреций Чукотского моря / О.Н. Колесник, А.Н. Колесник. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2013. – № 54 (7). – С. 853—866.

18. **Комов, В.Т.** Ртуть в абиотических и биотических компонентах водных и наземных экосистем посёлка городского типа на берегу Рыбинского водохранилища / В.Т. Комов, В.А. Гремячих, Ю.Г. Удоденко, Е.В. Щедрова [и др.]. – Текст : непосредственный // Труды ИБВВ РАН. – 2017. – №77(80). – С. 34 – 56.

19. **Комов, В.Т.** Содержание ртути в мышцах рыб реки Селенга и озер её бассейна (Россия) / Т.В. Комов, И.М. Пронин, Б. Мэндсайхан. – Текст : непосредственный // Биология внутренних вод. – 2014. – №2. – С. 89-89.

20. **Комов, Н.Т.** Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей / Н.Т. Комов, И.К. Степанова, В.А. Гремячих. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы водной токсикологии. Борок: ИБВВ РАН. – 2004. – С. 99–123.

21. **Кузнецов, В.В.** Физиология растений : учебник для вузов / В.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. – М.: Высшая школа, 2006. – 743 с. – ISBN 5-06-005703-8. – Текст : непосредственный.

22. **Кукина, С.Е.** Формы металлов в донных отложениях некоторых эстуариев бассейна Белого и Баренцева морей / С.Е. Кукина, Л.К. Садовникова, А. Калафат-Фрау [и др.]. – Текст : непосредственный // Геохимия. – 1999. – № 12. – С. 1324-1329.

23. **Купина, Н.М.** Основные результаты исследования двустворчатых моллюсков прибрежной зоны Японского моря / Н.М. Купина. – Текст : непосредственный // Известия ТИНРО. – 2015. – Т. 18. – С. 249-257.

24.**Кы, Н.В.** Устьевые области рек Вьетнама / Н.В. Кы. – Одесса: Астропринт, 2004. – 360 с. – Текст : непосредственный.

25.**Лавриненко, А.В.** Накопление тяжёлых металлов в моллюсках дельты реки Волги / А.В. Лавриненко, Г.Х. Ильясова. – Текст : непосредственный // Естественные науки. – 2010. – №4 (33). – С. 18-20.

26.**Лапердина, Т.Г.** Определение ртути в природных водах / Т.Г. Лапердина. – Новосибирск: «Наука», 2000. – 222 с. – ISBN 502031207X. – Текст : непосредственный.

27.**Линник, П.Н.** Влияние различных факторов на десорбцию металлов из донных отложений в условиях экспериментального моделирования. – Текст : непосредственный // Гидробиологический журнал. – 2006. – Т. 42. – № 3. – С. 97-113.

28.**Линник, П.Н.** Содержание и формы миграции металлов в воде Запорожского водохранилища / П.Н. Линник, В.А. Жежеря, И.Б. Зубенко, А.В. Зубко. – Текст : непосредственный // Гидробиологический журнал. – 2010. – Т. 46. – №4. – С. 97–116.

29.**Линник, П.Н.** Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П.Н. Линник, Б.И. Набиванец. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 270 с. – Текст : непосредственный.

30.**Лисицын, А.П.** Биогеохимия океана / А.П. Лисицын, Л.Л. Демина, В.В. Гордеев [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 367 с. – Текст : непосредственный

31.**Лисицын, А.П.** Маргинальный фильтр океанов / А.П. Лисицын. – Текст : непосредственный // Океанология. – 1994. – Т. 34. – №5. – С. 735-747.

32.**Лобанова, З.М.** Экология и защита биосферы: Учебное пособие. Доп. и перераб./ З. М. Лобанова. – Барнаул: Изд-во Алт ГТУ, 2009. – 228 с. – Текст : непосредственный.

33.**Лобус, Н.В.** Содержание ртути в компонентах экосистем водоемов и водотоков провинции Кхань Хоа (Центральный Вьетнам) / Н.В. Лобус, В.Т. Комов, Нгуен Тхи Хай Тхань. – Текст : непосредственный // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38 – № 6. – С. 733-739.

34. **Лукашев, Д.В.** Распределение тяжёлых металлов в органах моллюсков *Anodonta anatina* в условиях поступления загрязнённых стоков / Д.В. Лукашев. – Текст : непосредственный // Гидробиологический журнал. – 2009. – № 45 (5). – С. 98-109.

35. **Ляшенко, А.В.** Дрейссена бугская (*DREISSENA BUGENSIS* FENDR, *MOLLUSCA, BIVALVIA*) в Килийской дельте Дуная / А.В. Ляшенко, Е.Е. Зорина-Сахарова, В.В. Маковский. – Текст : непосредственный. // Гидробиологический журнал. – 2010. – Т. 46. – №1. – С.117-119.

36. **Минакова, В.В.** Исследование лизоцима из различных тканей двустворчатых моллюсков *Anodonta cygnea* / В.В. Минакова, И.В. Карнаухова, Т.В. Осинкина, В.В. Минакова. – Текст : непосредственный. // Вестник Уральской медицинской академической науки. – 2011. – №4/1. – С.109-110.

37. **Михайлов, В.Н.** Гидрология: Учебник для вузов / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов. – 2-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2007. – 463 с. – ISBN 978-5-06-005815-4. – Текст : непосредственный.

38. **Михайлов, В.Н.** Основы гидрологии устьев рек. / В.Н. Михайлов, М.В. Михайлова, Д.В. Магрицкий. – М.: Изд-во Триумф, 2018. – ISBN 978-5-89392-818-1 – Текст : непосредственный.

39. **Моисеенко, Т.И.** Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты / Т. И. Моисеенко. – М.: Наука, 2009. – 400 с. – ISBN 978-5-02-036166-9 (в пер.). – Текст : непосредственный.

40. **Моисеенко, Т.И.** Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: Технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология / Т.И. Моисеенко, Л.П. Кудрявцева, Н.А. Гашкина. – М.: Наука, 2006. – 261 с. – ISBN 5-02-033733-1. – Текст : непосредственный.

41. **Мур, Д.** Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния / Д. Мур, С. Рамамурти. – М.: Мир, 1987. – 250 с. – Текст : непосредственный.

42. **Муравьев, А.Г.** Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. 3-е изд., доп. и перераб / А.Г. Муравьев. – СПб.: «Крисмас+», 2004. – 248с. – ISBN 5-89495-113-5. – Текст : непосредственный.

43. **Нгуен Тхи Тхуи Ньунг.** К вопросу о накоплении тяжелых металлов (Pb, Hg, As) в компонентах водных экосистем устьевой области реки Красная (Хонгха) (Вьетнам) / Нгуен Тхи Тхуи Ньунг, И.В. Волкова. – Текст : непосредственный // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2018. – №1. – С. 132 – 140.

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

45. **Немова Н.Н.** Ртуть в рыбах: биохимическая индикация / Н.Н. Немова, Л.А. Лысенко, О.В. Мещерякова, В.Т. Комов. – Текст : непосредственный // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». –2014. – Т. 6. – № 2. – С. 76 – 86.

46. **Новинков, М.А.** К вопросу о фоновых значениях уровней содержания тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря / М.А. Новинков. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ. – 2017. – Т. 20. – №1/2. – С. 280 – 288.

47. **Одум, Е.** Основы экологии / Е. Одум. – М.: Мир, 1975. – 740 с. – Текст : непосредственный.

48. **Павлов, Д.С.** Разнообразие рыб по характеру и способам питания (трофическая классификация рыб) / Д.С. Павлов, А.О. Касумян. – М: МГУ, 2002. – 50 с. – ISBN 5-211-04730-3. – Текст : непосредственный.

49. **Павлов, Д.С.** Современное состояние коралловых рифов залива Нячанг (Южный Вьетнам) и возможные причины неблагополучия среды обитания склерактиний / Д.С. Павлов, А.В. Смуров, Л.В. Ильяш, Д.Н. Маторин [и др.]. – Текст : непосредственный // Биология моря. – 2004. – Т. 30. – № 1. – С. 60-67.

50. **Павлов, Д.С.** Экология внутренних вод Вьетнама. / Под редакцией Д.С.Павлова, Д.Д. Зворыкина. – М.: Т-во науч. изданий КМК, 2014. – 435 с. – ISBN 978-5-87317-977-0. – Текст : непосредственный.

51. **Пастухов, М.В.** Биоиндикация ртутного загрязнения Братского водохранилища / М.В. Пастухов, В.И. Гребенщикова. – Текст : непосредственный // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология, экология». – 2008. – № 2. – С. 132-135.

52. **Петросян, В.С.** Глобальное загрязнение окружающей среды ртутью и её соединениями / В.С Петросян // Россия в окружающем мире: 2006 (аналитический ежегодник). – М.: МНЭПУ, Авант, 2007. – 320 с. – ISBN 5-211-04730-3. – Текст : непосредственный.

53. **Петросян, В.С.** Ртуть и её соединения в окружающей среде / В.С. Петросян. – Текст : непосредственный. – М.: Мир, 2003. – С. 282 – 290.

54. **Петросян, В.С.** Химия, человек и окружающая среда / В.С. Петросян, Е.А. Шувалова. – М.: ООО «Буки Веди», 2017. – ISBN 978-5-4465-1537-0 – Текст : непосредственный.

55. **ПНД Ф 14.1:2:4.139 – 98.** «Методика выполнения измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра в питьевых, природных и сточных водах методом атомно-адсорбционной спектрометрии»./ Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. – Москва: Стандартинформ, 1998 (издание 2010 г.). – 18с. – Текст : непосредственный.

56. **Полонский, В.Ф.** Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря / В.Ф Полонский. (ред.). – М.:ГЕОС, 1998. – 280с. – ISBN 5-89118-041-3. – Текст : непосредственный.

57. **Ракитский, В.Н.** Современные проблемы загрязнения ртутью окружающей среды (обзор литературы) / В.Н. Ракитский, Т.А. Синицкая, С.В. Скупневский. – Текст : непосредственный // Гигиена окружающей среды. – Т. 99. – №5. – С. 460 – 467.

58.РД **52.18.827-2016** Массовая доля ртути в пробах почв, грунтов, донных отложений и биологического материала. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии «холодного пара». – Обнинск, 2017. – 38с. – Текст : непосредственный

59.РД **52.18.843-2017** Массовая доля ртути органических соединений в пробах почв, донных отложений и биологического материала. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии «холодного пара». – Обнинск, 2017. – 40с. – Текст : непосредственный

60.**Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты:** сборник трудов Второго международного симпозиума (Новосибирск, 21-25 сентября 2015г.) / редкол.: Л.М. Левченко, А.А. Галицкий. – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2015. – 418с. – ISBN 978-5-901688-34-2 – Текст : непосредственный.

61.**Ртуть: экологические аспекты применения** // Совместное издание Программы ООН по окружающей среде, Международной организации труда и Всемирной организации здравоохранения. Женева, 1992. – 131с. – ISBN 5-225-01878-5. – Текст : непосредственный.

62.**Самойлов, Н.В.** Устья рек / Н.В. Самойлов. – М. : Географгиз, 1952. – 526 с. – Текст : непосредственный.

63.**Система Белого моря.** Т. 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Под ред. А.П. Лисицына, И.А. Немировской. – М. Научный мир, 2012. – 782 с. – ISBN 978-5-91522-319-5 (в пер.). – Текст : непосредственный.

64.**Скибинский, Л.Э.** Роль геохимических барьеров и геохимических барьерных зон в формировании гидрохимического режима прибрежных вод морей Арктики / Л.Э. Скибинский. – Текст : непосредственный // Труды XII съезда Русского географического общества. – СПб., 2005. – Т. 5. – С. 148-155.

65.**Соловых, Г.Н.** Влияние тяжёлых металлов на лизоцимную активность пресноводных двустворчатых моллюсков родов *Unio* и *Anodonta* / Г.Н. Соловых, В.В. Минакова, И.В. Карнаухова. – Текст : непосредственный // Вестник ОГУ. – 2006. – №12. – С. 235-237.

66. **Соловых, Г.Н.** Оценка гидрохимического загрязнения водных экосистем на территории Оренбургской области / Г.Н. Соловых, Л.В. Голинская, Г.М. Тихомирова, Л.Г. Фабарисова. – Текст : непосредственный // Вестник ОГУ. – 2011. – №12(131). – С. 146-148.

67. **Соловых, Г.Н.** Реакция защитных ферментов двустворчатых моллюсков вида *Unio pictorum* на воздействие свинца и ртути / Г.Н. Соловых, В.В. Минакова, И.В. Карнаухова, В.В. Минакова [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ОГУ. – 2011. – №12(131). – С. 245-247.

68. **Степанова, И.К.** Накопление ртути в рыбе из водоемов Вологодской области / И.К. Степанова, В.Т. Комов. – Текст : непосредственный // Экология. – 1997. – Т. 28. – №4. – С. 196-202.

69. **Сухенко, С.А.** Ртуть в водохранилищах: новый аспект антропогенного загрязнения биосферы / С.А. Сухенко // Аналит. обзор / СО РАН. Ин-твод.иэкол. проблем, ГПНТБ. – Новосибирск, 1995. – 59 с. – ISBN 5-7623-1082-5.– Текст : непосредственный.

70. **Сюзанна, М.У.** Ртуть в природных водных объектах: обзор факторов, влияющих на метилирование / М.У. Сюзанна, В.Т. Тревор, А.А. Светлана/ – Текст : непосредственный // Environmental Science and Technology. – 2001. – №31(3).– С. 241-293 (En).

71. **Титов, А.Ф.** Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам : учебное пособие / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с. – ISBN 978-5-9274-0491-9.– Текст : непосредственный.

72. **Ульрих, С.М.** Ртуть в природных водных объектах: обзор фактов, влияющих на метилирование / С.М. Ульрих, Т.В. Тантон, С.А. Абдрашитова. – Текст : непосредственный // Environmental Science and Technology. – 2001. – №31(3). – С. 241-293.

73. **Фёдоров, Ю.А.** Основные результаты экспедиционных исследований на Северной Двине и Двинской губе Белого моря / Ю.А. Фёдоров, Д.Н. Гарькуша, А.Э. Овсеян, А.Н. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Известия вузов,

Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону. – 2005. – №3. – С. 95-100.

74. **Фёдоров, Ю.А.** Распределение и уровни концентрации ртути в атмосфере и водоемах Азовского моря / Ю.А. Фёдоров, О.А. Березан, М.Л. Величко, Л.М. Предеина [и др]. – Текст : непосредственный – Апатиты: изд-во КНЦ РАН – 2002. – С. 150-166.

75. **Фёдоров, Ю.А.** Ртуть в водных экосистемах Севера ЕТР и её биогеохимические особенности распределения, миграции и трансформации / Ю.А. Фёдоров, Д.Н. Гарькуша, А.Э. Овсепян // Сборник трудов II научно-практической конференции «Экологические проблемы. Взгляд в будущее». - Ростов-на-Дону. – 2005. – С. 121-124.

76. **Фёдоров, Ю.А.** Ртуть и метан: особенности образования и распределения в поверхностных водах. – Текст : непосредственный // Проблемы гидрометеорологии и геоэкологии. Сборник научных статей. – Ростов-на-Дону: изд-во СКНЦ ВШ АПСН. – 2004. – С.200-213.

77. **Хажеева, З.И.** Особенности накопления тяжёлых металлов в воде, донных отложениях и биотезалива Черкалов сор оз. Байкал / З.И. Хажеева, Н.М. Пронин, Л.Д. Раднаева [и др.]. – Текст : непосредственный // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – №13. – С. 95-102.

78. **Чаплыгин, В.А.** Содержание ртути в мышцах гидробионтов Каспийского моря / В.А. Чаплыгин, Т.С. Ершова, В.Ф. Зайцев. – Текст : непосредственный // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2016. – №2. – С. 108 – 114.

79. **Шитиков, В.К.** Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг, Т.Д. Зинченко. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с. – ISBN 5-93424-109-5.– Текст : непосредственный.

80. **Шулькин, В.М.** Геохимия металлов при седиментогенезе в прибрежной зоне моря / В.М. Шулькин. – Текст : непосредственный // Геохимия. – 1990. – №3.– С. 457 – 462.

81. **Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз, ситуации, пути развития, решения** : материалы международной конференции, (Архангельск 17-22 июня 2002г.) / отв. Ред. Ф. Н. Юдахин. - Архангельск : Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 2002. – Т. 2. – 1125 с. – ISBN 5-85879-018-6. – Текст : непосредственный.

82. **Barwick, M.** Biotransference and biomagnification of selenium, copper, cadmium, zinc, arsenic and lead in a temperate seagrass ecosystem from Lake Macquarie Estuary, NSW, Australia / M. Barwick, W. Maher // *Mar. Environ. Res.* – 2003. – Vol. 56. – №4. – P. 471-502.

83. **Beldowska, M.** Simple screening technique for determination of adsorbed and absorbed mercury in particulate matter in atmospheric and aquatic environment / M. Beldowska, Saniewska D, Gębka K [et al]. – *Talanta.* – 2018. – Т. 182. – P. 340 – 347.

84. **Boney, A.D.** Sub-lethal effects of mercury on marine algae / A.D. Boney // *Mar. pollut. Bull.* – 1971. – Vol. 2. – P. 69 – 71.

85. **QCVN 08-MT:2015/BTNMT.** National technical regulation on surface water quality. – 7p.

86. **Craig, P.J.** Organometallic compounds in the Environment / P.J.Craig. – London: Wiley, 2003. – 380 p. – ISBN:9780471899938.

87. **Czuba, M.** Differential mitotic toxicity of methylmercury in various meristematic tissues (apex, bud, root) of *Elodea densa* / M. Czuba, D.C. Mortimer // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* – 1982. – Vol. 6. – P. 204 – 215.

88. **De, A.K.** Study of toxic effects of Hg(II) on *Pistia stratiotes* / De A.K, A.K. Sen, D.P. Modak, S. Jana // *Water Air Soil Pollut.* – 1985. – P. 351 – 360.

89. **Dietz, R.** What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota / R. Dietz, C. Sonne, N. Basu et al. // *Sci. Total Environment* – 2013. – Vol. 443. – P. 775–790.

90. **Domagalski, J.** Occurrence and transport of total mercury and methyl mercury in the Sacramento River Basin, California // *J. Geochem. Explor.* – 1998. – Vol. 64. – №1-3. – P. 277-291.

91.**Fitzgerald, W.F.** Is mercury increasing in the atmosphere? The need for an atmospheric mercury network (AMNET)/ W.F. Fitzgerald // Water Air Soil Pollut. – 1995. – Vol. 80. – №1-4. – P. 245-254.

92.**Garcia-Ordiales, E.** Occurrence and speciation of arsenic and mercury in estuarine sediments affected by mining activities (Asturias, Northern Spain) / Garcia-Ordiales E, Covelli S, Rico JM, Roqueñí N, Fontolan G, Flor-Blanco G, Loredó J. // Chemosphere – 2018. – T. 198. – P. 281 – 289.

93.**Guentzel, J.L.** Mercury associated with colloidal material in an estuarine and an open-ocean environment / J.L. Guentzel, R.T. Powell // Marine Chemistry.– 1996. – Vol. 55. – p. 177 – 188.

94.**Hai Luu Duc.** Accumulation of mercury in sediment and bivalves from Cua Dai estuary, Hoi An city / Hai Luu Duc, et al // VNU Journal of Science: Earth Sciences. – 2010 – № 26. – P. 48 – 54.

95.**Hopkin, R.** The effects of some pollutants on the survival, growth and respiration of *Laminaria hyperborea* / R. Hopkin, J.M. Kain // Estuarine coastal mar. Sci. – 1978. – Vol. 7. – P. 531 – 553.

96.**Hrenchuk, L.E.** Dietary and waterborne mercury accumulation by yellow perch: a field experiment / L.E. Hrenchuk, P.J. Blanchfield, M.J. Paterson, H.H. Hintelmann // Environ. Sci. Technol. – 2012. – Vol. 46. – P. 509–516.

97.**JECFA - Methylmercury.** Summary and conclusion of the 61th Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemistry Safety - WHO Technical Report Series. – 2004. – T. 922. – P.132-139.

98.**JECFA - Methylmercury.** Summary and conclusion of the 67th Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemistry Safety WHO Technical Report Series. – 2006. – T. 940. –P. 57-61.

99.**Kim, M.K.** Fate and transport of mercury in environmental media and human exposure / M.K. Kim, K.D. Zoh // J. Prev. Med. Public Health. – 2012. – Vol. 45. – P. 335–343.

100. **Langston, W.J.** Assessment of the distribution and availability of arsenic and mercury in estuaries / W.J. Langston // *Estuar. Manag. Quality Assess*, (ed. Wilson), Plenum Press, N.Y. – 1985. – P. 131-146.
101. **Lawson, N. M.** The fate and transport of mercury, methylmercury, and other trace metals in Chesapeake Bay Tributaries / N. M. Lawson, R.P. Mason, J.M. Laporte // *Water Research*. – 2001. – Vol. 35 – №2. – P. 501-515.
102. **Le Xuan Sinh.** Assessment of Pollution Load into Thi Nai lagoon, Vietnam and Prediction to 2025 / Le Xuan Sinh, Le Van Nam, Luu Van Dieu, Cao Thi Thu Trang, Nguyen Thi Phuong Hoa, Tran Duc Thanh // *International Journal of Sciences*. – 2015. – № 4. – P. 116 – 119.
103. **Le Xuan Sinh.** Bioaccumulation of mercury in clams *Meretrix Lyrata* (Sowerby, 1825) cultured at the Bach Dang estuary: A recommendation for safe daily dosage consumption of clams in Vietnam / Le Xuan Sinh, Mai Huong // *Vietnam Journal of Science and Technology*. – 2020. – № 58(4). – C. 493 – 504.
104. **Le, Q.A.** Environmental plan for the delta of the Red River and some environmental problems in this area / Q.A. Le // National Vietnamese Project KC.08.02. In: “Proceeding of the First Conference on Science” of the Project KC.08: Environmental Protection and some Methods for Natural Disasters. Ministry of Science and Technology, Hanoi. – 1998. – 209 p.
105. **Le, T.P.Q.** The changing flow regime and sediment load of the Red River, Viet Nam / Le T.P.Q., Garnier, J., Billen, G., Théry, S., Chau, V.M. // *Journal of Hydrology*. – 2007. – № 334. – P. 199 – 214.
106. **Li, Y.H.** Lake Biwa and the ocean: geochemical similarity and difference / Y.H. Li, Y. Sohrin, T. Takamatsu // *Limnology*. – 2010. – Vol. 12 – №1. – P. 89-101.
107. **Li, K.** Modeling total maximum allocated loads for heavy metals in Jinzhou bay, China / Li K., Shi X., Bao X., Ma Q., Wang // *Marine pollution bulletin*. – 2014 – № 85(2). – P. 659-664.
108. **Lindberg, S.E.** Synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition / S.E. Lindberg, R. Bullock, R. Ebinhaus // *AMBIO*. – 2007. – Vol. 36 – №1. – P. 19-32.

109. **Li-Qiang, X.** 700-year record of mercury in avian eggshells of Guangjin Island, South China Sea / Li-Qiang X., Xiao-Dong L., Li-Quang S., Qian-Qian C [et al] // *Envir. Pollut.* – 2011. – Vol. 159 – № 4. – P. 889-896.
110. **Liu, J.** Bioaccumulation of heavy metals and health risk assessment in three benthic bivalves along the coast of Laizhou Bay, China / Liu J., Cao L., Dou S // *Marine Pollut Bull.* – 2017. – №117. – P. 98-110.
111. **Lutter, R.** Mercury in the environment. A volatile problem / Lutter R., Irwin E. // *Environment.* – 2002. – Vol. 44. – № 9. – P. 24-41.
112. **Luu, T.N.M.** Hydrological regime and water budget of the Red River Delta (Northern Vietnam) / Luu T N M, Garnier J, Billen G, Orange D, Nemery J, Le T P Q, Tran H T, Le L A // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2017. – № 37. – P. 219 – 228.
113. **Manasreh, W.** Heavy metal and anionic contamination in the water and sediments in Al-Mujib reservoir, central Jordan / Manasreh W., Hailat I., El-Hasan T.M. // *Environmental Earth Sciences.* – 2010. – Vol. 60. – P. 613–621.
114. **Mason, R.P.** Distribution and biogeochemical cycling of mercury in the equatorial Pacific Ocean / R.P. Mason, W. F. Fitzgerald // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* – 1993. – Vol. 40. – №9. – P. 1897-1924.
115. **Mason, R.P.** Mercury biogeochemical cycling in a stratified estuary / R.P. Mason, W.F. Fitzgerald, J. Hurley, A.K. Hanson, P.L. Donaghay, J.M. Sieburth // *Limnol.Oceanogr.* – 1993. – Vol. 38. – №6. – P. 1227-1241.
116. **Mason, R.P.** The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences / R.P. Mason, W.F. Fitzgerald, F.M.M. Morel // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1994. – Vol. 58. – №15. – P. 3191-3198.
117. **Mason, R.P.** Uptake, toxicity, and trophic transfer of mercury in a coastal diatom / R.P. Mason, J.R. Reinfelder, F.M.M. Morel // *Environ. Sci. Technol.* – 1996. – Vol. 30. – №6. – P. 1835-1845.
118. **Mauro, J.B.N.** Mercury methylation in macrophytes, periphyton, and water - comparative studies with stable and radio-mercury additions / J.B.N. Mauro, J.R.D. Guimaraes, H. Hintelmann, C.J. Watras, E.A. Haack, S.A. Coelho-Souza // *Anal. and Bioanal. Chem.* – 2002. – Vol. 374. – №6. – P. 983-989.

119. **Miller, J.R.** The role of geomorphic processes in the transport and fate of mercury in the Carson River basin, west-central Nevada / J.R. Miller, P.J. Lechler, M. Desilets // *Environ. Geol.* – 2004 – Vol. 33. – №4. – P. 249-262.

120. **Mindaugas, R.** Assessment of heavy metal contamination and spatial distribution in surface and subsurface sediment layers in the northern part of Lake Babrukas / Mindaugas Raulinaitis, Gytautas Ignatavičius // *Ecologija.* – 2012. – Vol. 58. – №1. – P. 33 – 43.

121. **Morel, P.M.** The Chemical Cycle and Bioaccumulation of Mercury / P.M. Morel, A.M. Kraepiel, M. Amyot // *Annual Review of Ecology and Systematic.* – 1998. – Vol. 29. – P. 543-566.

122. **Nevado, B.J.J.** Mercury in the Tapajos River basin, Brazilian Amazon: A review / B.J.J. Nevado, R.C. Rodriguez, J.J. Bernardo, A.M., M.A. Nascimento, M.E. Crespo-Lopez // *Environment Intemafional.* – 2010. – Vol. 36. – №6. – P. 593-608.

123. **Noelia, S. La Colla.** Mercury cycling and bioaccumulation in a changing coastal system: From water to aquatic organisms / Noelia S. La Colla, Sandra E. Botte, E. Jorge // *Marine Pollution Bulletin.* – 2019. – Vol. 140. – P. 40-50.

124. **Obrist, D.** Bromine-induced oxidation of mercury in the mid-latitude atmosphere / D. Obrist, E. Tas, M. Peleg, V. Matveev, X. Fain, D. Asaf, M. Luria // *Nature Geosciences.* – 2011. – Vol. 4. – P. 22-26.

125. **Obrist, D.** Mercury concentrations and pools in four Sierra Nevada forest sites, and relationships to organic carbon and nitrogen / D. Obrist, D.W. Johnson, S.E. Lindberg // *Biogeosciences.* – 2009. – №6. – P. 765–777.

126. **Pacyna, E.G.** Global Emission of Mercury from Anthropogenic Sources in 1995 / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna // *Water, Air, and Soil Pollution.* – 2002. – Vol. 137. – №1-4. – P.149-165.

127. **Pacyna, E.G.** Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna, F. Steenhuisen, S.J. Wilson // *Atmospheric Environment.* – 2006. – Vol. 40. – №22. – P. 4048-4063.

128. **Pham Kim Phuong.** To study accumulation of heavy metals As, Cd, Pb and Hg in Bivalves from natural environment / Pham Kim Phuong, Nguyen Thi Dung // Science and technology (in Vietnam). – 2007. – Vol. 45. – №5. – P. 57–62.

129. **Pham Ngoc Ho.** Total Environment Quality Index (TEQI) in Assessing Environmental Components (Air, Soil and Water) // VNU Journal of Science: Earth Science. – 2011. – Vol. 27. – P. 127 – 134.

130. **Pruszek, Z.** Hydrology and morphology of two river mouth regions (temperate Vistula Delta and subtropical Red River Delta) / Z. Pruszek, Pham V.N., M. Szmytkiewicz, M.H. Nguyen, R. Ostrowski // Oceanologia. – 2005. – Vol. 47. – №3. – P. 365–385.

131. **Quintana, G. C.** Record of Hg pollution around outset of colonization in Southern Brazil / G. C. Quintana, N. Mirlean // Environmental Monitoring and Assessment. – 2019. – Vol. 191. – P. 1-8.

132. **Sheehan, M.C.** Global methylmercury exposure from seafood consumption and risk of developmental neurotoxicity: a systematic review / M.C. Sheehan, T.A. Burke, A. Navas-Acien, P.N. Breyse [et al.] // Bull. World Health Organ. – 2014. – Vol. 92. – P. 254–269.

133. **Van-Maren, D.S.** Water and sediment dynamics in the Red River mouth and adjacent coastal zone. Journal of Asian Earth Sciences. – 2007. – Vol. 29. – P.508–522.

134. **Watras, C.J.** Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs / C.J. Watras, R.C. Back, S. Halvorsen, R.J.M. Hudson [et al.] // Sci. Total Environ. – 1998. – Vol. 219. – №2-3. – P. 183-208.

135. **Watras, C.J.** Mercury and methylmercury in individual zooplankton: implication for bioaccumulation / C.J. Watras, N.S. Bloom // Limnology and Oceanography. – 1992. – Vol. 37. – №6. – P. 1313-1318.

136. **Wolfenden, S.** Sulfide species as a sink for mercury in lake sediments / S. Wolfenden, J.M. Charnock, J. Hilton [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2005. – Vol. 39. – P. 6644-6648.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Сведения о гидрохимической оценке воды устьевой области реки Красная

Таблица А.1 – Средние значения гидрохимических показателей воды устьевой области реки Красная

№	Станция	Название станции	Т, °С	рН	Соленость, ‰	РК	COD	BOD5	Fe	ВВ	C_орг	Концентрация растворенной Hg	Концентрация взвешенной Hg в поверхностном слое	Концентрация взвешенной Hg в придонном слое	Hg в ДО в 0-5 см	Hg в ДО в 5-10 см
1	St 1	Вьет Чи	22.5	6.9	0.0	6.8	24.0	12.3	2.28	85.0	0.04	0.0950	0.070	0.100	0.700	0.820
2	St 2	проток Чали	22.3	7.2	0.0	6.2	15.3	12.0	1.80	52.0	0.03	0.0550	0.200	0.600	0.600	0.650
3	St 3	река Красная	24.5	7.8	0.0	6.4	17.1	7.5	2.12	99.7	1.95	0.0750	0.450	0.820	0.750	0.800
4	St 4	пр Нинько	23.8	7.9	0.0	6.5	11.2	5.0	1.90	75.0	1.00	0.0650	0.260	0.540	0.600	0.700
5	St 5	пр Дай	23.2	7.5	0.0	7.0	11.0	5.5	1.70	45.0	0.05	0.0450	0.380	0.780	0.600	0.650
6	St 6	устье Чали	24.8	7.9	2.0	8.6	17.2	7.2	2.70	68.0	1.02	0.0550	0.400	0.960	0.750	0.850
7	St 7	устье Балат	24.9	8.3	7.9	8.8	19.3	9.5	3.15	107.0	2.45	0.0800	0.680	1.250	0.950	1.020
8	St 8	устье Дай	24.8	8.4	7.0	8.2	9.4	6.4	2.50	72.0	1.83	0.0700	0.580	1.000	0.750	0.900
9	St 9	устье Нинько	24.7	7.9	8.0	8.5	9.8	6.8	2.20	86.0	1.75	0.0575	0.500	0.950	0.800	1.000
10	St 10	взморе	22.5	8.1	18.0	7.2	9.2	7.2	2.90	15.2	1.09	0.0600	0.400	0.980	1.100	1.210
11	St 11	взморе	22.4	7.9	20.0	6.9	10.6	6.6	3.00	23.5	1.43	0.0500	0.420	0.910	1.200	1.300
12	St 12	взморе	22.3	8.0	18.0	6.7	11.2	8.2	3.50	45.6	2.02	0.0550	0.700	1.300	1.250	1.320
13	St 13	взморе	22.6	8.0	21.0	7.3	11.5	7.1	3.10	32.7	1.56	0.0400	0.320	1.000	1.150	1.220
14	St 14	взморе	22.5	7.9	22.0	7.1	8.5	4.5	3.00	28.6	1.48	0.0425	0.550	1.100	1.120	1.180
15	St 15	взморе	22.4	8.1	19.0	7.5	7.9	5.2	2.90	23.0	1.02	0.0425	0.500	0.960	1.000	1.160

№	Станция	Название станции	T, °C	pH	Соленость, ‰	PK	COD	BOD5	Fe	BB	C_орг	Концентрация растворенной Hg	Концентрация взвешенной Hg в поверхностном слое	Концентрация взвешенной Hg в придонном слое	Hg в ДО в 0-5 см	Hg в ДО в 5-10 см
16	St 20	взморе	23.1	8.0	25.0	7.3	8.6	6.6	2.00	8.5	0.95	0.0475	0.410	0.860	0.920	1.120
17	St 21	взморе	21.4	8.0	26.0	7.2	7.5	5.5	2.10	12.3	0.83	0.0425	0.310	0.700	1.000	1.050
18	St 22	взморе	22.8	8.1	22.0	7.3	6.1	4.8	2.40	26.0	1.05	0.0415	0.420	0.800	1.110	1.130
19	St 23	взморе	22.7	8.1	25.0	7.1	7.7	6.8	2.20	19.0	0.78	0.0325	0.350	0.670	1.000	1.120
20	St 24	взморе	23.2	8.0	25.0	7.5	8.1	7.2	1.90	17.0	0.75	0.0275	0.360	0.720	1.000	1.030
21	St 25	взморе	23.3	8.0	26.0	7.4	9.2	7.8	1.90	13.2	0.73	0.0245	0.300	0.700	0.900	1.000
22	St 30	взморе	22.6	8.1	28.0	7.3	8.6	7.5	1.30	4.6	0.40	0.0300	0.150	0.600	0.850	0.920
23	St 31	взморе	22.4	8.1	29.0	7.2	8.5	7.3	1.20	6.2	0.45	0.0245	0.180	0.500	0.800	0.950
24	St 32	взморе	22.5	8.2	26.0	7.3	8.1	7.2	1.30	12.8	0.50	0.0190	0.250	0.680	0.850	0.900
25	St 33	взморе	22.4	8.2	29.0	7.1	7.8	7.0	1.20	8.6	0.32	0.0190	0.210	0.700	0.900	0.950
26	St 34	взморе	22.3	8.2	28.0	7.5	7.2	6.5	1.20	7.2	0.35	0.0215	0.230	0.650	0.850	0.880
27	St 35	взморе	21.9	7.9	28.5	7.4	6.8	5.6	1.10	5.3	0.32	0.0185	0.190	0.680	0.800	0.850
28	St 40	взморе	22.1	8.0	32.0	7.2	7.8	6.2	0.60	3.4	0.35	0.0140	0.070	0.420	0.700	0.800
29	St 41	взморе	21.6	8.0	31.0	6.9	7.2	5.8	0.70	3.3	0.38	0.0140	0.090	0.420	0.700	0.870
30	St 42	взморе	21.5	8.0	29.0	6.7	6.6	4.5	0.80	4.3	0.40	0.0140	0.100	0.500	0.750	0.820
31	St 43	взморе	21.4	8.2	32.0	7.3	7.3	4.8	0.50	3.6	0.30	0.0110	0.080	0.350	0.600	0.700
32	St 44	взморе	21.3	7.9	33.0	7.1	6.8	4.2	0.60	3.1	0.28	0.0120	0.080	0.400	0.600	0.650
33	St 45	взморе	20.6	8.0	32.0	7.5	7.1	4.6	0.50	3.0	0.25	0.0100	0.075	0.360	0.600	0.620

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сведения о содержании ртути в гидробионтах в устьевой области реки Красная

Таблица Б.1 – Содержание ртути в тканях двустворчатых моллюсков устьевой области реки Красная

№	Масса, г	Длина, см	Hg в жабрах, мкг/кг	Hg в мантии, мкг/кг	Hg в гепатопанкреасе, мкг/кг	Hg в теле, мкг/кг	Среднее содержание ртути, мкг/кг	Концентрация взвешенной Hg, мкг/г	Концентрация Hg в донных отложениях, мкг/г с.м.
<i>Meretrix lyrata</i>									
1	14.10	37.00	53.50	55.00	60.00	51.80	55.10	0.95	0.80
2	14.20	38.00	61.20	62.30	65.00	57.70	61.60	0.96	0.75
3	14.30	39.00	63.10	64.20	68.20	53.70	62.30	0.96	0.75
4	14.40	40.00	87.50	97.90	90.00	84.90	87.60	1.25	0.95
5	14.50	41.00	88.20	89.00	92.50	87.80	89.40	1.00	0.75
6	14.60	42.00	89.70	91.20	94.80	88.90	91.20	0.98	1.10
7	14.70	43.00	92.80	94.00	97.00	92.50	94.10	0.91	1.20
8	14.80	45.00	97.20	98.00	102.60	95.00	98.20	1.30	1.25
9	14.10	37.00	54.10	55.00	60.50	47.10	54.20	0.96	0.75
10	14.20	38.00	56.20	58.20	61.20	48.00	55.90	0.96	0.75
11	14.30	39.00	51.20	54.80	64.70	49.10	55.00	0.95	0.80
12	14.40	40.00	65.20	68.20	71.50	52.40	64.30	0.96	0.75
13	14.50	41.00	62.40	65.80	72.00	55.00	63.80	0.96	0.75
14	14.60	42.00	72.40	75.00	78.60	67.80	73.50	0.95	0.80
15	14.70	43.00	75.20	76.50	80.20	74.50	76.60	1.00	0.75
16	14.80	44.00	82.80	83.00	85.60	81.20	83.20	1.25	0.95

№	Масса, г	Длина, см	Hg в жабрах, мкг/кг	Hg в мантии, мкг/кг	Hg в гепатопанкреасе, мкг/кг	Hg в теле, мкг/кг	Среднее содержание ртути, мкг/кг	Концентрация взвешенной Hg, мкг/г	Концентрация Hg в донных отложениях, мкг/г с.м.
17	14.90	45.00	86.90	88.60	94.00	86.40	89.00	1.25	0.95
18	14.10	37.00	56.80	59.00	64.50	52.50	58.20	0.78	0.60
19	14.20	38.00	52.60	55.00	65.00	51.00	55.90	0.96	0.75
20	14.30	39.00	67.00	71.20	81.30	64.50	71.00	0.95	0.80
<i>Anadara granosa</i>									
1	14.10	37.00	103.50	115.00	140.00	101.80	115.10	1.00	0.75
2	14.20	38.00	108.20	112.30	145.00	103.70	117.30	1.25	0.95
3	14.30	39.00	112.40	114.20	148.20	107.70	120.60	1.25	0.95
4	14.00	34.00	100.50	107.90	129.00	95.90	108.30	0.95	0.80
5	14.10	35.00	108.20	109.00	132.50	97.80	111.90	0.96	0.75
6	14.10	36.00	109.70	111.20	134.80	102.80	114.60	1.25	0.95
7	14.20	37.00	102.80	114.00	137.00	102.50	114.10	0.95	0.80
8	14.30	38.00	107.10	118.00	142.50	105.00	118.20	0.91	1.20
9	14.20	37.00	104.00	105.00	140.50	103.70	113.30	1.00	0.75
10	14.30	38.00	106.30	118.20	141.20	108.00	118.40	1.25	0.95
11	14.40	39.00	110.00	114.80	144.70	109.10	119.70	1.30	1.25
12	14.10	35.00	105.20	108.20	131.50	102.50	111.90	0.96	0.75
13	14.00	34.00	102.40	105.60	122.00	99.20	107.30	0.78	0.60
14	14.10	35.00	102.40	106.50	118.60	100.80	107.10	0.96	0.75
15	14.20	36.00	105.20	116.50	128.60	100.20	112.60	1.25	0.95
16	14.30	37.00	102.80	113.00	135.60	103.20	113.70	1.00	0.75
17	14.40	38.00	106.90	118.60	136.00	106.40	117.00	0.98	1.10
18	14.10	36.00	105.80	109.00	124.30	102.50	110.40	1.25	0.95

№	Масса, г	Длина, см	Hg в жабрах, мкг/кг	Hg в мантии, мкг/кг	Hg в гепатопанкреасе, мкг/кг	Hg в теле, мкг/кг	Среднее содержание ртути, мкг/кг	Концентрация взвешенной Hg, мкг/г	Концентрация Hg в донных отложениях, мкг/г с.м.
19	14.20	38.00	102.70	116.00	135.00	104.00	114.40	1.10	1.12
20	14.30	39.00	106.00	121.20	139.50	107.60	118.60	0.96	1.00
<i>Austriella corrugate</i>									
1	86.10	67.00	403.50	455.00	460.00	341.80	415.00	1.25	0.95
2	86.30	68.00	421.50	462.30	465.00	347.70	424.10	1.30	1.25
3	87.60	69.00	423.10	464.20	468.20	353.60	427.30	1.30	1.25
4	84.40	60.00	407.50	447.90	461.00	324.90	410.30	0.78	0.60
5	84.50	61.00	408.20	449.00	462.50	327.70	411.90	0.96	0.75
6	84.60	62.00	409.10	451.20	464.80	338.90	416.00	1.25	0.95
7	84.70	63.00	402.80	454.00	467.00	342.90	416.70	1.25	0.95
8	85.80	65.00	407.20	458.00	472.60	345.00	420.70	0.91	1.20
9	86.10	66.00	404.00	455.90	470.50	347.20	419.40	1.10	1.12
10	87.30	68.00	416.20	458.20	461.20	348.00	420.90	1.30	1.25
11	84.00	59.00	401.20	425.60	464.70	317.20	420.20	1.10	1.12
12	84.20	60.00	402.00	438.00	461.20	321.30	405.60	0.78	0.60
13	84.50	61.00	402.10	445.80	472.00	322.00	410.50	1.25	0.95
14	85.00	62.00	405.60	448.20	478.60	325.20	414.40	0.96	1.00
15	85.00	62.00	405.20	449.10	478.20	325.60	414.50	0.98	1.10
16	85.10	64.00	408.80	453.00	485.60	331.80	419.80	1.10	1.12
17	86.00	65.00	409.20	448.60	474.00	336.00	417.00	1.25	0.95
18	86.20	67.00	417.50	459.00	474.50	342.70	423.40	1.30	1.25
19	84.20	60.00	402.70	442.00	465.00	329.00	409.70	0.96	0.75
20	84.50	61.00	407.00	452.10	471.20	331.50	415.50	1.25	0.95

№	Масса, г	Длина, см	Hg в жабрах, мкг/кг	Hg в мантии, мкг/кг	Hg в гепатопанкреасе, мкг/кг	Hg в теле, мкг/кг	Среднее содержание ртути, мкг/кг	Концентрация взвешенной Hg, мкг/г	Концентрация Hg в донных отложениях, мкг/г с.м.
<i>Lutraria rhynchaena</i>									
1	67.90	82.00	23.50	36.00	36.50	21.80	29.50	0.70	0.90
2	68.00	83.00	24.20	36.80	37.00	22.50	30.10	0.80	1.11
3	68.10	84.00	24.50	37.40	38.20	23.10	30.80	0.96	1.00
4	67.40	80.00	22.00	35.80	35.80	20.90	28.60	0.68	0.85
5	67.50	81.00	22.50	36.10	36.20	21.50	29.10	0.70	0.90
6	67.60	82.00	23.70	35.60	36.70	22.00	29.70	0.95	0.80
7	67.70	83.00	24.70	37.20	37.70	22.50	30.50	0.96	1.00
8	68.00	84.00	25.20	38.90	39.60	23.00	31.70	0.91	1.20
9	67.30	81.00	24.10	35.50	36.00	21.70	29.30	0.95	0.80
10	67.50	82.00	24.20	35.80	36.10	22.80	29.70	0.95	0.80
11	67.90	83.00	25.10	37.40	37.80	23.90	31.10	0.98	1.10
12	67.60	80.00	22.50	36.80	35.50	20.40	28.80	0.78	0.60
13	68.00	84.00	26.40	38.60	39.20	22.80	31.80	0.98	1.10
14	67.20	82.00	24.10	37.50	36.80	21.30	29.90	0.96	0.75
15	67.70	83.00	25.20	37.70	38.20	22.00	30.80	0.96	1.00
16	68.00	84.00	25.80	38.30	38.50	23.20	31.50	0.91	1.20
17	68.50	85.00	26.90	38.90	39.80	25.40	32.80	1.30	1.25
18	67.80	82.00	24.20	36.90	37.50	21.50	30.00	0.96	1.00
19	68.00	84.00	26.50	37.80	37.90	23.00	31.30	0.91	1.20
20	68.30	85.00	26.70	38.10	39.00	25.00	32.20	1.00	1.15