

На правах рукописи



ЛОБУС

Николай Васильевич

**СОДЕРЖАНИЕ И МИГРАЦИЯ РТУТИ В АБИОТИЧЕСКИХ И
БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТАХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ
ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА**

03.02.08 – Экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Борок – 2012

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии наук Институте
биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Научный руководитель:

доктор биологических наук, профессор

Виктор Трофимович Комов

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук

Валентина Ивановна Лазарева

доктор геолого-минералогических наук

Людмила Львовна Дёмина

Ведущая организация:

Учреждение Российской Академии наук Институт биологии Карельского
Научного центра РАН

Защита состоится «__» февраля 2012 года в 10⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета ДМ002.036.01 при Учреждении Российской Академии
наук Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН по адресу:
152742 пос. Борок Некоузского района Ярославской области, Тел/факс (48547)
24042; www.ibiw.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской Академии наук Институте биологии внутренних вод им. И.Д.
Папанина РАН

Автореферат разослан «__» декабря 2011

Ученый секретарь
диссертационного совета д.б.н.



Л.Г. Корнева

Актуальность исследования. Ртуть обладает уникальными физико-химическими свойствами, что обуславливает особенности ее концентрирования и перераспределения в различных компонентах окружающей среды, а разнообразие форм определяет специфику миграции и трансформации в природных и техногенных условиях [Ullrich et al., 2001; Lindberg et al., 2007; Obrist et al., 2011]. В отличие от других тяжелых металлов она способна эффективно накапливаться в пищевых цепях водных экосистем, оказывая широкий и разносторонний спектр негативных воздействий на живые организмы, их популяции и экосистемы в целом [Mason et al., 1996; Barwick, Maher, 2003; Немова, 2004].

В настоящее время накоплен большой фактический материал по закономерностям миграции и накоплению ртути в водных экосистемах умеренных и северных широт, что исторически обусловлено высокой концентрацией промышленных объектов в этих регионах [Haines et al., 1992; Mercury Pollution ..., 1994; Kamman et al., 2004].

Индустриальная эпоха характеризуется активным использованием человеком полезных ископаемых, что в итоге приводит к изменениям глобальных и региональных циклов многих химических элементов [Bashkin, 2006]. На сегодняшний день объемы антропогенной эмиссии ртути сопоставимы с количеством металла, поступающего в окружающую среду из естественных природных источников, и по разным оценкам составляют 1.93-2.3 тыс. т/г., при этом более 60% всех выбросов приходится на долю стран Юго-Восточной Азии [Расуна, 2005; Wilson, 2006; UNEP, 2008]. Установлено, что современное повышение содержания ртути в биоте азиатского региона связано с региональными изменениями биогеохимического цикла металла и смещением за последние 40 лет центра антропогенных выбросов из Европы и Америки в Азию [Расуна et al., 2006; Li et al., 2009].

Несмотря на то, что общепризнанным является факт наличия глобальной пространственной диспропорции антропогенных выбросов ртути в атмосферу, работы по водоемам региона Юго-Восточной Азии единичны и не носят системного характера [Li-Qiang et al., 2011]. Большинство водных исследований по миграции Hg в тропиках и субтропиках были сосредоточены на экосистемах Амазонии и Флориды, где ртуть активно использовали при добыче золота и серебра [Lacerda et al., 1999; Alpers et al., 2000; Nevado et al., 2010]. Однако биоаккумуляция и миграция ртути в тропических экосистемах по-прежнему остается малоизученной темой [Campbell et al., 2003].

Цель и задачи исследования. Цель работы – выявить уровни биоаккумуляции ртути и основные закономерности ее миграции в водных экосистемах Центрального и Южного Вьетнама.

При этом были поставлены следующие задачи:

1. Определить содержание ртути в воде, сестоне, грунтах и гидробионтах (рыбе) водных экосистем Центрального и Южного Вьетнама;
2. Проанализировать зависимость содержания Hg в мышечной ткани рыб от основных абиотических и биотических факторов среды;
3. Исследовать связь между содержанием органического вещества различного генезиса и концентрацией ртути в донных отложениях;
4. Выявить значение мангровых зарослей в аккумуляции металла (Hg) в грунтах прибрежных морских экосистем;
5. Изучить особенности миграции в водных экосистемах Вьетнама различных соединений ртути в зависимости от состава органического вещества и концентрации Fe.

Научная новизна. Впервые проведено комплексное изучение содержания ртути в различных компонентах водных экосистем (воде, взвешенном веществе, донных отложениях, рыбе) Центрального и Южного Вьетнама. Установлено, что органический углерод и соленость являются наиболее важными факторами, влияющими на соотношение растворенных и взвешенных форм ртути в воде. Выявлено, что терригенное органическое вещество может играть важную роль в динамике металла между водоемами и их водосборами. Исследованы уровни содержания Hg в мышечной ткани рыб из разнотипных водных объектов, показано, что возраст искусственных водоемов важный фактор накопления металла в рыбе.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты вносят вклад в изучение механизмов миграции и биоаккумуляции ртути в водоемах разных климатических зон, а также в развитие теории функционирования водных экосистем в условиях загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.

Полученные данные являются основой для организации экологического мониторинга водных объектов, разработки региональных критериев оценки качества вод и рыбной продукции; могут быть включены в учебные курсы по специальностям «Гидробиология», «Общая экология», «Биологические последствия загрязнения», «Охрана окружающей среды», «Экологическая геохимия», «Геоэкология».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Накопление ртути в мышечной ткани рыб обладает выраженной тропической специфичностью. Наибольшая вариабельность содержания металла характерна для видов-эврифагов. По сравнению с водоемами умеренных и северных широт, для тропического Вьетнама характерны более низкие уровни содержания ртути в мышечной ткани рыб.

2. Для донных отложений водных экосистем тропического Вьетнама, по сравнению с водоемами умеренных и северных широт, характерны более низкие уровни содержания ртути. Локальное повышение концентрации металла связано с его поступлением с суши. В литоральной зоне мангровые заросли могут способствовать эффективному накоплению Hg в верхнем горизонте донных осадков.

3. В водных экосистемах Вьетнама ртуть мигрирует преимущественно в растворенной форме. При увеличении доли растворенного органического углерода, и повышении солености воды происходит возрастание относительной геохимической подвижности элемента, а при увеличении концентрации железа – ее уменьшение.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертации были представлены на Международной конференции «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» (Москва, 2010), IV Международном симпозиуме «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах» (Санкт-Петербург, 2011), XIX Международной Школе-конференции «Геология океанов и морей» (Москва, 2011); Всероссийских конференциях «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы» (Борок, 2008, 2011), «Организмы, популяции, экосистемы: проблемы и пути сохранения биоразнообразия» (Вологда, 2008).

По теме диссертации опубликовано 15 работ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 104 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, состоящего из 181 источника, в том числе 154 иностранных, содержит 22 рисунка и 26 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своим учителям Н.Ю. Сулиной, к.с.-х.н. В.П. Паршикову, к.б.н. Н.А. Галкиной, к.б.н. Е.Н. Животовой, к.б.н. Н.Ю. Пантелеевой. Научному руководителю В.Т. Комову. Дирекции и сотрудникам Российско-Вьетнамского Тропического и технологического центра и лично к.б.н. В.К. Нездолию; к.б.н. Е.С. Гусеву, Е.Е. Мишиной, Нгуен Тхи Хай Тхань за неоценимую помощь в организации и

проведении полевых и экспедиционных работ; д.б.н. Т.А. Бритаеву и О.В. Савинкину за предоставленную возможность и помощь в сборе материала в мангровых экосистемах; к.б.н. И.А. Столбунову, к.б.н. Б.А. Лёвину, к.б.н. Д.А. Астахову за помощь в определении пресноводных и морских видов рыб; д.г.-м.н. Е.А. Романкевичу и д.г.-м.н. В.И. Пересыпкину за ценные замечания и проявленный интерес к работе; Н.А. Шульге за помощь в определении углеводов; М.С. Поняеву за помощь в определении органического углерода; всему коллективу лабораторий физиологии и токсикологии водных животных ИБВВ РАН и химии океана ИО РАН. Автор благодарит своих родителей, друзей и коллег за терпение и поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

Представлен обзор литературных данных по эмиссии ртути из различных источников в окружающую среду, особенностям ее распределения и трансформации в водных экосистемах разных климатических зон, закономерностям трофической миграции металла и биологическим последствиям его накопления живыми организмами.

Глава 2. Район исследования, материалы и методы

2.1. Краткая физико-географическая характеристика района исследований

Район исследований располагался на территории, простирающейся в широтном направлении на 850 км, в меридиональном на 320 км. В пределах материка район исследований ограничен: с севера – 15° с.ш. (провинция Куанг Нам), юга и востока – 10°02' с.ш. и 105°47' в.д. (город Кан Тхо), с запада – 109°11' в.д. (провинция Кхань Хоа). Островной границей являлся архипелаг Кон Дао – 8°41' с.ш. и 106°36' в.д. (рис. 1а).

В качестве базового полигона исследований были выбраны водные объекты провинции Кхань Хоа. Изучали миграцию и уровни содержания ртути в воде, взвешенном веществе, донных отложениях и биоте водохранилищ (Да Бан, Кам Лам, Суои Зау, Суои Чау), р. Кай и ее притоках (Кхе, Кау, Зау), эстуарии реки, прилегающей акватории залива Нячанг. В донных отложениях литоральной зоны мангровых зарослей бухты Дам Бай (о. Че) изучали вертикальное и горизонтальное распределение металла. Схема расположения станций отбора проб представлена на карте (рис. 1б).

Для выявления пространственных различий содержания Hg исследовали уровни металла в абиотических и биотических компонентах водных экосистем в 7 провинциях: Куанг Нам, Дак Лак, Кхань Хоа, Биньтхуан, Бария-Вунгтау, Донг Най, Кан Тхо и архипелаге Кон Дао.

Объем выполненных работ представлен в табл. 1.

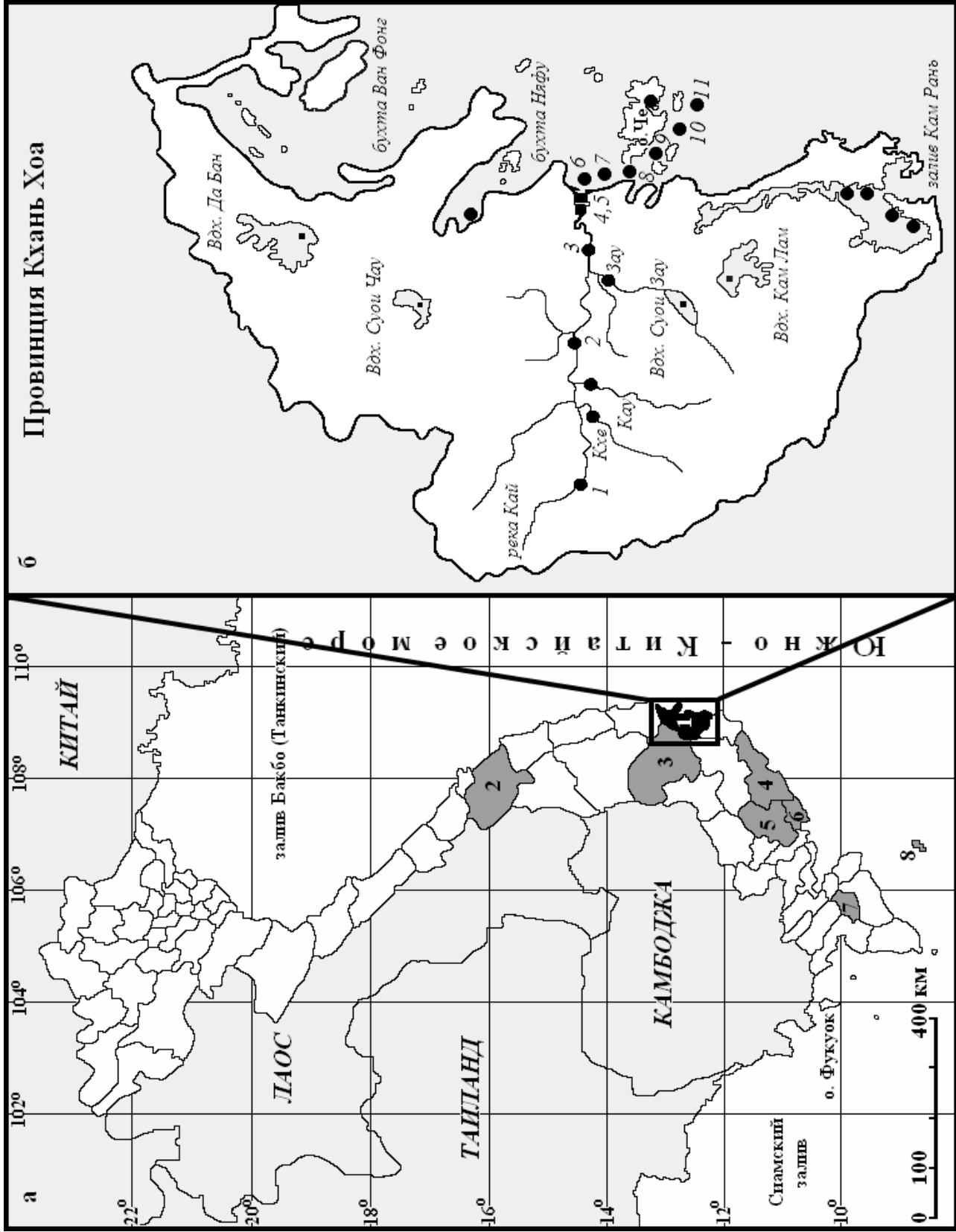


Рис. 1. Карта - схема района исследований.

1а. Цифрами обозначены провинции:

- 1 - Кхань Хоа
- 2 - Куанг Нам
- 3 - Дак Лак
- 4 - Биньхуан
- 5 - Донг Най
- 6 - Бариа-Вунгтау
- 7 - Кан Тхо
- 8 - арх. Кон
- Дао

1б. Провинция Кхань Хоа. Точками обозначены станции отбора проб

Таблица 1. Объем работы, выполненной по теме диссертации

Провинция	Количество проб				Дата сбора материала
	воды	взвешенного вещества	донных отложений	рыбы	
Куангнам	-	-	15	192	май-июнь 2009 г.
Дак Лак	-	-	45	87	август 2010 г.
Кхань Хоа	206	206	97	473	январь – июнь 2009 г., апрель – сентябрь 2010 г.
Биньтхуан	-	-	-	45	апрель 2010 г.
Бариа-Вунгтау	-	-	-	18	апрель 2010 г.
Донг Най	-	-	4	-	сентябрь 2010 г.
Кан Тхо	-	-	8	125	март 2009 г.
Архипелаг Кон Дао	-	-	11	-	апрель 2010 г.
Всего: Σ1532	206	206	180	940	

2.2. Химико-аналитические методы

Вода. В течение всего периода наблюдений пробы воды отбирали один раз в месяц из поверхностного слоя по соответствующей сетке станций: река Кай (станции 1-6), притоки, водохранилища (рис. 1б). Для разделения растворенных и взвешенных форм ртути в лабораторных условиях пробы воды фильтровали на установке «Millipore» через мембранный фильтр (диаметр 47 мм, размер пор 0.45 мкм). Для определения концентрации растворенного и взвешенного углерода пробы воды фильтровали через стекловолоконные фильтры GF/F («Whatman», диаметр 47 мм, размер пор 0.5-0.7 мкм). Для определения количества взвешенного вещества воду фильтровали через ядерные фильтры с размером пор 0.2 мкм.

Донные отложения отбирали стратометром с лодки или в процессе водолазного погружения. Для предотвращения загрязнения образцов тяжелыми металлами в процессе отбора проб пресноводных, эстуарных и морских осадков использовали пластиковую трубку. Грунты, находившиеся в контакте с деталями оборудования, отделяли от основной части пробы, и брали центральную часть. Для анализа $C_{орг}$ и *n*-алканов донные осадки высушивали при +60⁰С, для определения Hg – при комнатной температуре.

Рыба. В лабораторных условиях проводили биометрический анализ. Мышечную ткань высушивали при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. При проведении экспедиционных работ рыбу замораживали при -15⁰С, после в лаборатории подготавливали к анализу по описанной схеме.

Аналитические методы. Измерение массовой концентрации общей ртути в исследуемых пробах осуществляли атомно-абсорбционным методом с зеемановской коррекцией неселективного поглощения на анализаторе ртути РА-915+, используя приставки РП-91 и ПИРО-915+ («ЛЮМЕКС», г. Санкт-Петербург). Количественное определение железа и марганца осуществляли спектрофотометрически. Определение органического углерода ($C_{\text{орг}}$) проводили на анализаторе Shimadzu-Europe TOC 5000-V-CPH с использованием приставки SSM-5000A. Экстракты углеводов анализировали на газовом хроматографе GC-2010 фирмы «Shimadzu» (Япония). Полученные хроматограммы обрабатывали с помощью программного обеспечения GCsolution 2.30 SU4 фирмы «Shimadzu».

2.3. Метрологический контроль и статистическая обработка данных

Процесс отбора, транспортировки, пробоподготовки и инструментального анализа образцов полностью соответствовал стандартным методикам и международным требованиям, предъявляемым к соответствующим аналитическим работам [Standard Methods ..., 1999; Методика выполнения ... ПНДФ 16.1:2.23-2000 и М 04-46-2007, 2000; 2007].

Для метрологического контроля качества получаемых результатов анализа использовали стандарты: ионов ртути (ГСО 7324-96), почвы (ГСО СДПС 2498-83, 2499-83, 2500-83), международных стандартов донных отложений (СДО 1, СДО 2, СДО 3, SRM-1646, SRM-2700, Mess-3) и тканей рыб (DOLT-2, DORM-2)

Результаты обрабатывали статистически с помощью пакета программ STATGRAPHICS Plus 6.0. и представляли в виде средних значений и их ошибок ($x \pm m_x$). Достоверность различий оценивали, используя метод дисперсионного анализа (ANOVA, LSD-тест) при уровне значимости $p \leq 0.05$.

Глава 3. Результаты исследования

3.1. Водная миграция и уровни содержания ртути в водоемах и водотоках провинции Кхань Хоа

По продольному профилю реки средняя концентрация общей ртути (сумма Hg^P и Hg^B) увеличивалась. В течение всего периода наблюдения количество растворенных форм (Hg^P) было в 2-3 раза больше по сравнению с взвешенными (Hg^B) (рис. 2а). Характер изменений концентраций Hg^P и Hg^B по профилю река→эстуарий→море различался. На пресноводном участке (станции 1-3) средние значения Hg^P практически не изменялись и находились на уровне 9-10 нг/л, при этом для Hg^B происходило двукратное увеличение концентрации с 3 нг/л на ст. 1 до 6 нг/л на станции 3. В эстуарии (станции 4-5) содержание

растворенных форм ртути увеличивалось до 13-14 нг/л и достигало максимума (26 нг/л) на станции 6, концентрация Hg^B , наоборот уменьшалась с 4 нг/л на ст. 4 до 1 нг/л на ст. 6.

Общее содержание ртути в притоках реки было схожим и изменялось в пределах 13-16 нг/л. Доля Hg^P в общей концентрации ртути превышала 60% (рис. 2б).

В поверхностном слое мезотрофных водохранилищ Суои Зау, Кам Лам и Да Бан концентрация $Hg_{общ}$ изменялась от 12 до 20 нг/л. При этом наименьшее содержание отмечено в водохранилище Кам Лам. Для водохранилище Суои Чау среднее значение $Hg_{общ}$ составило 48 нг/л. Соотношения взвешенных и растворенных форм были аналогичны таковым в р. Кай и ее притоках (рис. 2в).

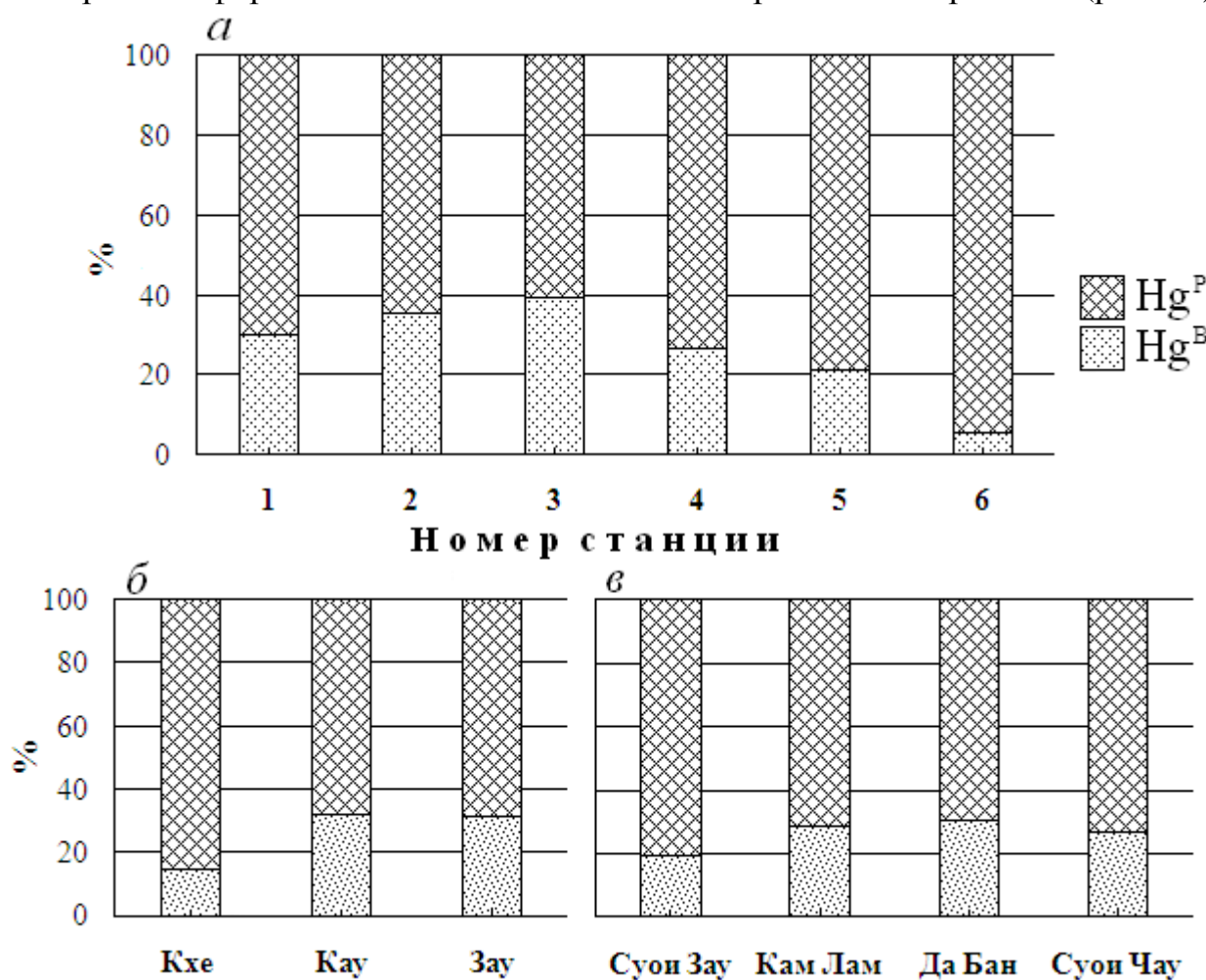


Рис. 2. Процентное соотношение растворенных и взвешенных форм ртути: а - на станциях по профилю река→эстуарий→море; б - в притоках; в - в водохранилищах.

Концентрация взвешенных форм ртути положительно коррелировала с уровнем содержания железа в воде. Для пресноводного участка реки и ее притоков связь была достоверной и в зоне смешения речных и морских вод возрастала, коэффициент корреляции составлял 0.38 ($p < 0.05$) и 0.57 ($p < 0.02$)

соответственно. В водохранилищах связь этих параметров была очень слабой и недостоверной ($r=0.14$, $p=0.57$).

В изученных водных объектах соотношение $\text{Hg}^{\text{P}}/\text{Hg}^{\text{B}}$, отражающее относительную геохимическую подвижность элемента, достоверно зависело от $C_{\text{орг}}^{\text{P}}/C_{\text{орг}}^{\text{B}}$ ($r=0.68$, $p<0.01$) и в меньшей степени от содержания железа в воде ($r=-0.32$, $p<0.01$). С увеличением доли растворенного органического углерода доля растворенных форм металла возрастала, с повышением концентрации железа – уменьшалась.

В зоне смешения речных и морских вод с увеличением солености относительная геохимическая подвижность ртути увеличивалась и достоверно описывалась уравнением регрессии: $y=2.01+0.76x$ (где y – $\text{Hg}^{\text{P}}/\text{Hg}^{\text{B}}$, x – соленость; $r=0.83$, $p<0.001$).

3.2. Роль терригенного органического вещества в поступлении металла в донные отложения водных экосистем провинции Кхань Хоа

Содержание ртути в донных отложениях профиля река→эстуарий→залив изменялось в среднем от 4.2 до 61 нг/г. Минимальные значения отмечены на участках верхнего течения реки (ст. 1), а так же в притоках Кхе и Кау. Максимальные концентрации металла в донных осадках разреза были приурочены к эстуарию (станции 4 и 5) и району порта (ст. 8), где содержание Hg колебалось в пределах 40-50 нг/г и 55-70 нг/г соответственно. Различия в содержании металла в грунтах исследованных водохранилищах (Суои Чау, Суои Зау, Да Бан, Кам Лам) незначительны, средняя концентрация составила 50 нг/г.

Концентрация металла в осадках коррелировала с содержанием органического углерода ($r=0.74$, $p<0.001$). Влияние литологической принадлежности грунтов на распределение Hg выражалось в приуроченности минимальных концентраций к песчаным осадкам, которые характеризовались наименьшими уровнями $C_{\text{орг}}$. В алевритово-пелитовых и пелитовых илах увеличивалось содержание органического вещества, и возрастала концентрация ртути.

На основе анализ группового распределения *n*-алканов в грунтах выявлено три основных генетических типа органического вещества: I тип – *автохтонное органическое вещество*, образованное остатками гидробионтов; II тип – *смешенное автохтонно-аллохтонное органическое вещество*, образованное остатками гидробионтов и терригенным материалом; III тип – *органическое вещество преимущественно терригенного происхождения*.

С помощью молекулярных биомаркеров органического вещества оценена роль терригенного материала в поступлении Hg в водные экосистемы. Концентрация металла достоверно возрастала с увеличением содержания длинноцепочечных углеводородов ($\sum C_{23}-C_{35}$ - *n*-алканы, маркёры терригенного ОВ) ($r= 0.82, p<0.01$). Аналогичная взаимосвязь между ртутью и $\sum C_{10}-C_{22}$ (маркёры автохтонного ОВ) так же была положительна, но менее значима и недостоверна ($r= 0.42, p=0.1$).

Ненарушенные и нетрансформированные естественные прибрежные экосистемы в качестве обязательного элемента, необходимого для их устойчивого функционирования, включают мангровые заросли. Для оценки потенциальной роли мангровых зарослей в накоплении Hg в грунтах, исследовали распределение металла в литоральной зоне бухты Дам Бай. В горизонтальном разрезе (при переходе от верхней зоны литорали к нижней) происходило снижение концентрации ртути. Наибольшие изменения ее содержания зарегистрированы в зоне средней литорали, где были искусственные посадки *Rhizophora stylosa* (Grif., 1923) различного возраста. При переходе участков с посадками 2004 года (мангры с хорошо развитыми воздушными корнями) к участкам с посадками 2006 года (мангры с плохо развитыми воздушными корнями) концентрация металла снижалась в 4 раза. В вертикальном разрезе (при увеличении глубины) происходило снижение содержания металла (рис. 3).

3.3. Содержание ртути в мышечной ткани рыб из водоемов провинции Кхань Хоа

В водоемах провинции Кхань Хоа были определены уровни содержания ртути в мышечной ткани 12 пресноводных видов рыб. В р. Кай максимальные значения средних величин (1311.8 и 1074.3 нг/г) отмечены у пресноводного саргана *Xenotodon cancila* (Hamilton, 1822) и сома *Clarias batrachus* (L., 1758), минимальные (43.4 и 134 нг/г) – у нильской тилляпии *Oreochromis niloticus* (L., 1758) и пунтиуса *Mystacoleucus marginatus* (Valenciennes, 1842) соответственно. В выборках сома и саргана у 18.3 и 10.3% особей концентрация Hg была выше 2000 нг/г, а единичные экземпляры сома содержали > 3000 нг/г.

Помимо межвидовых различий у всех исследованных видов рыб из р. Кай отмечен высокий внутривидовой разброс показателя. Например, у змееголова *Channa striata* (Bloch, 1793) с массой тела < 100 г концентрация металла варьировала от 69 до 1910, с массой 100-200 г – от 70 до 1480, >200 г – от 239 до 1790 нг Hg/г.

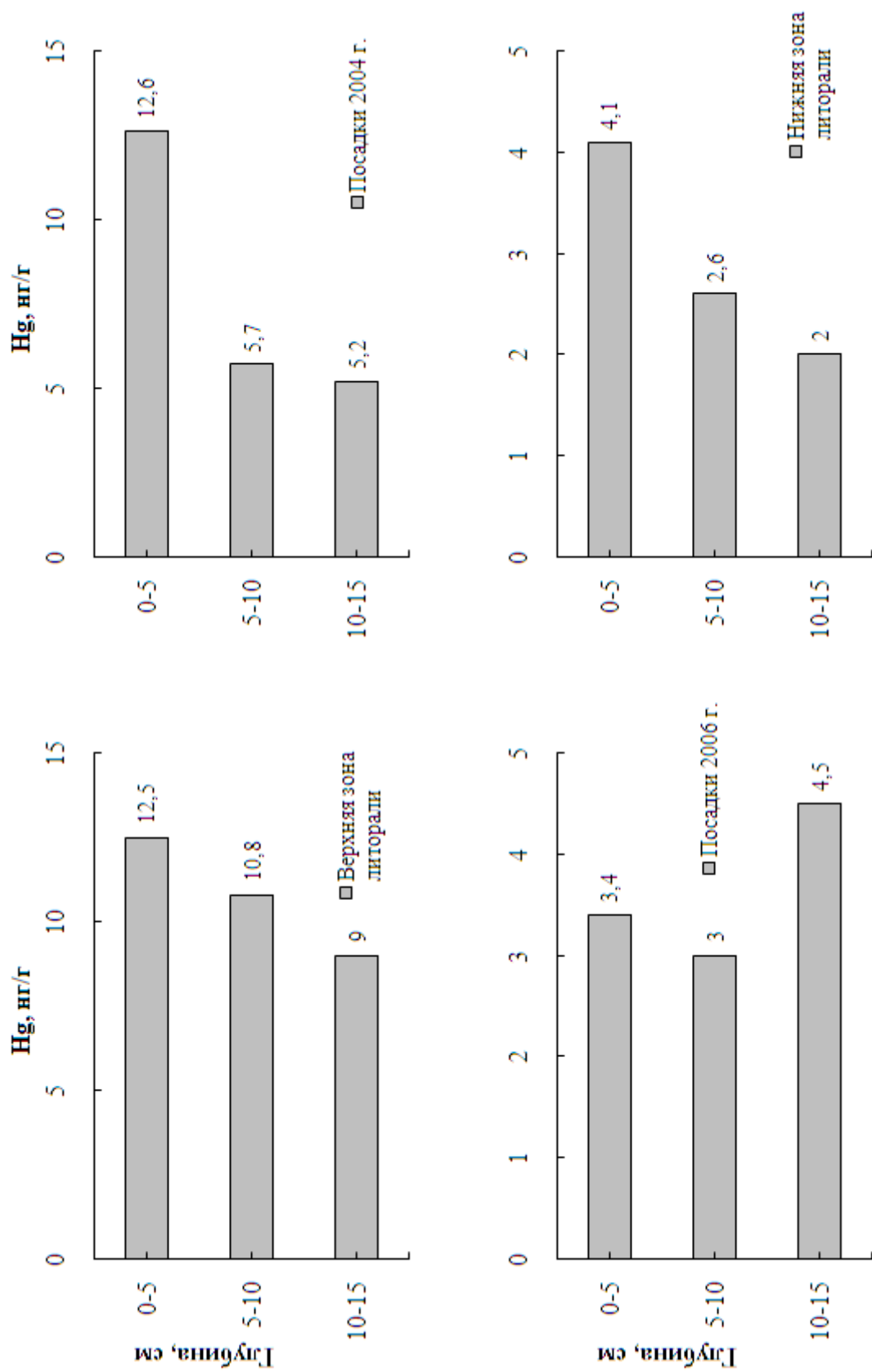


Рис. 3. Горизонтальное и вертикальное распределение ртути в грунтах литорали бухты Дам Бай.

Для пяти из 12 видов рыб, обитающих в р. Кай, установлена достоверная положительная связь содержания ртути с массой тела, однако у этих же видов из водохранилищ Кам Лам и Суои Чау она не выявлена.

Для двух видов (*Anabas testudineus*, Bloch, 1792 и *Clarias batrachus*) зарегистрировано увеличение массы тела и концентрации ртути у особей, выловленных в нижнем течении. У змееголовов *Channa striata* и *Ch. gachua*, Hamilton, 1822 обнаружена обратная зависимость: рыбы, выловленные в нижнем течении, были более крупными, но содержали меньше Hg.

Характер ранжирования видов (по уровню содержания ртути) из водохранилища Кам Лам был иным. Максимальные концентрации отмечены у змееголова *Ch. striata*, минимальные – у нильской тилляпии (*O. niloticus*). При этом содержание Hg в мышечной ткани данных видов было в 2-3 раза выше, чем у выловленных в реке.

Типичным представителем ихтиофауны исследованного региона является змееголов *Channa striata*, он занимает высокое положение в трофической цепи рек и водохранилищ. При сопоставлении данных по концентрации Hg в мышцах змееголова из трех водных объектов выявлено наиболее высокое содержание металла у особей из водохранилища Кам Лам, а наиболее низкое – из водохранилища Суои Чау, особи из р. Кай занимали промежуточное положение (рис. 4).

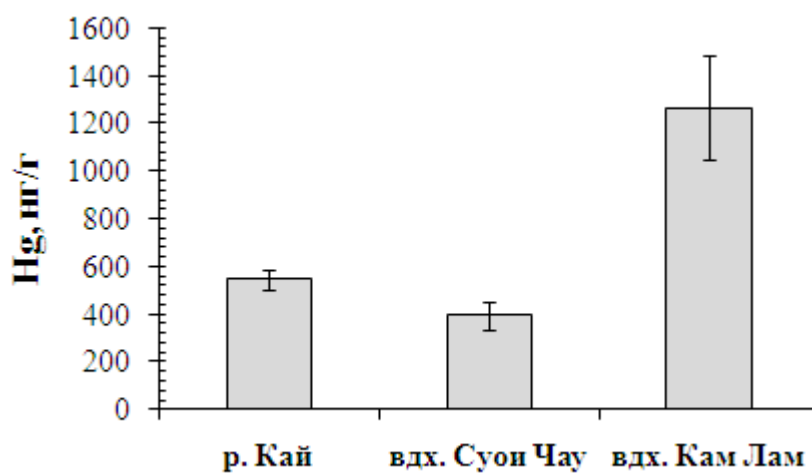


Рис. 4. Содержание ртути в мышечной ткани змееголова *Channa striata* из водных объектов провинции Кхань Хоа.

Изученные виды рыб различались по типу питания. К фитобентофагам относились нильская тилляпия (*Oreochromis niloticus*) и пунтиус (*Mystacoleucus marginatus*), к планктофагам – *Osteochilus hasselti* и *Puntius* sp., к зоофагам (факультативные ихтиофаги) – *Channa gachua*, *Ch. striata*, *Monopterus albus*,

Notopterus notopterus, *Ompok bimaculatus*, *Xenodon cancila*, к эврифагам – *Anabas testudineus*, *Clarias batrachus*.

Объединение видов из р. Кай в группы по трофологическому признаку продемонстрировало четкую зависимость накопления Hg в мышцах рыб от типа питания. По мере увеличения положения вида в трофической цепи происходило достоверное возрастание содержания металла (рис. 5). При этом у всех групп рыб коэффициент вариации был > 25 , что свидетельствовало о высокой вариабельности показателя в пределах выделенных групп.

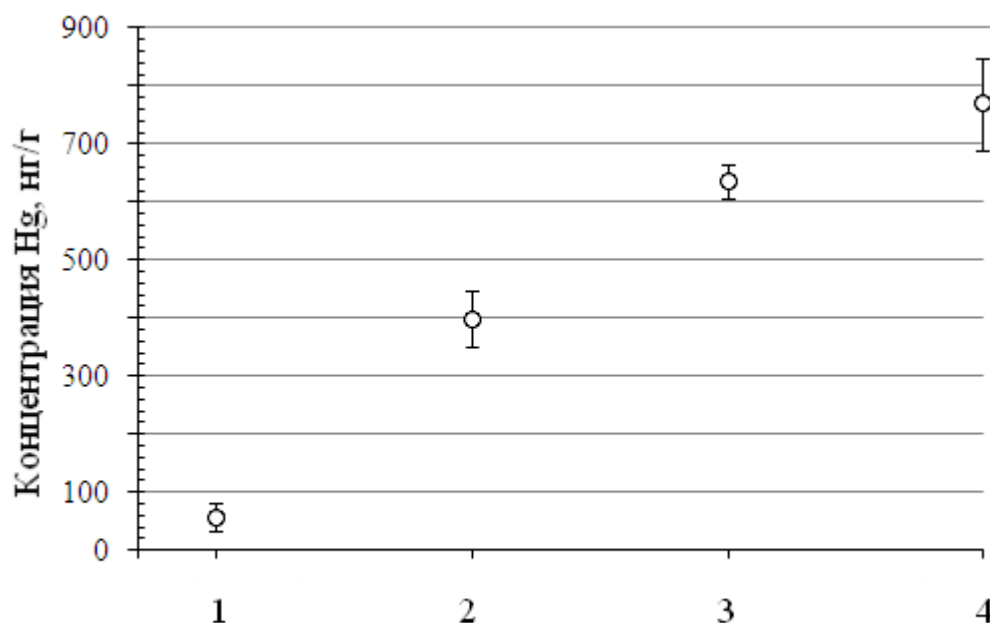


Рис. 5. Содержание ртути в мышечной ткани рыб с разным типом питания (различия достоверны при $p < 0.001$). 1- фитобентофаги ($n=26$), 2 - планктофаги ($n=26$), 3 - зоофаги (факультативные хищники) ($n=237$), 4 - эврифаги ($n=108$).

Для сравнения было проанализировано содержание ртути в мышечной ткани морских видов рыб, выловленных в заливе Нячанг и прилегающих участках Южно-Китайского моря. Средняя концентрация Hg в мышцах изменялась от 100 до 500 нг/г. Более высокие уровни содержания металла отмечены в единичных экземплярах скорпены (*Scorpena* sp.) и морского окуня (*Lutjanus* cf. *fulviflamma*) – 2720 и 1040 нг Hg/г.

3.4. Уровни содержания ртути в донных отложениях и рыбе из водоемов Центрального и Южного Вьетнама (пространственное распределение)

Концентрация ртути в донных отложениях водоемов Центрального и Южного Вьетнама изменялась в широких пределах – от 1.5 до 110 нг/г. Однако

на подавляющем числе станций значения были существенно ниже величины кларка металла в Земной коре (80 нг/г или $8 \times 10^{-6} \%$ по массе) (рис. 6).

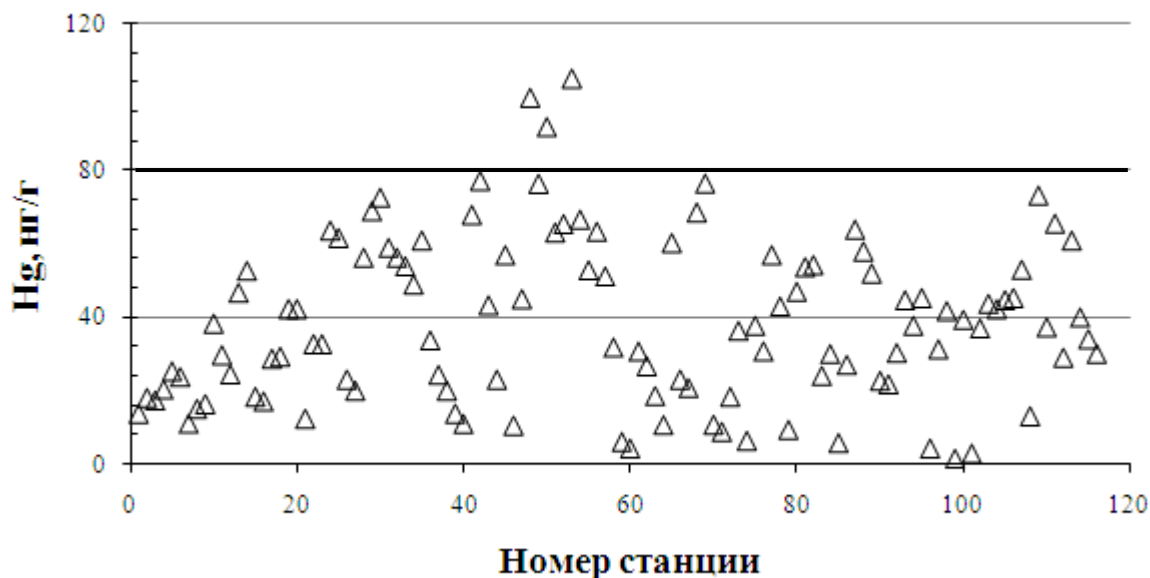


Рис. 6. Уровни содержания ртути в донных отложениях водоемов Центрального и Южного Вьетнама (черта – значение кларка ртути в Земной коре).

Для исследованного региона отмечены высокие различия минимальных и максимальных значений концентрации ртути в мышечной ткани пресноводных видов рыб (от 8.8 до 4130 нг/г). Коэффициенты биологического накопления металла варьировали от 6.7×10^3 до 3.3×10^6 . Однако только у 4.3% особей от общего объема выборки (940 экз.) концентрация металла была $\geq 1500 \text{ нг/г}$, при этом 19.4% рыб содержали в мышечной ткани $\leq 100 \text{ нг Hg/г}$, а отдельные экземпляры $< 10 \text{ нг Hg/г}$ (рис. 7).

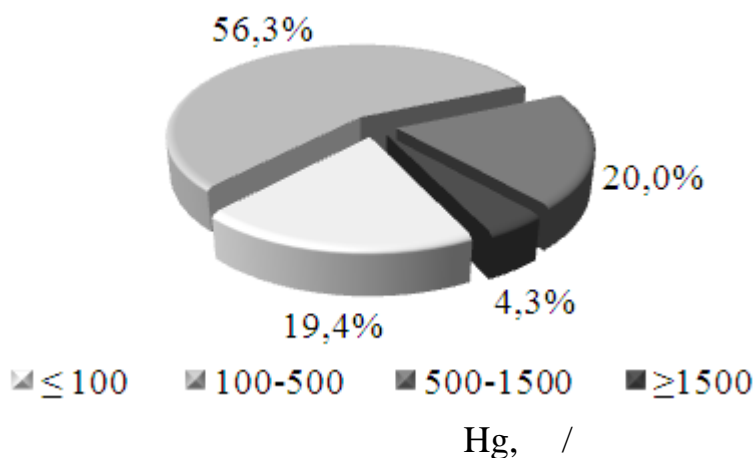


Рис 7. Процентное распределение рыб из водоемов Центрального и Южного Вьетнама с различным содержанием металла.

3.5. Прибрежные морские экосистемы (провинция Кхань Хоа и архипелаг Кон Дао)

Для пространственной оценки содержания Hg в осадках прибрежных морских экосистем определяли концентрацию металла в донных отложениях литоральной части мангровых зарослей провинций Кхань Хоа и архипелага Кон Дао. Содержание Hg варьировало от 1 до 35 нг/г и было значительно ниже по сравнению с фоновыми значениями (15-30 нг/г), установленными для незагрязненных прибрежных грунтов Бразилии (рис. 8).

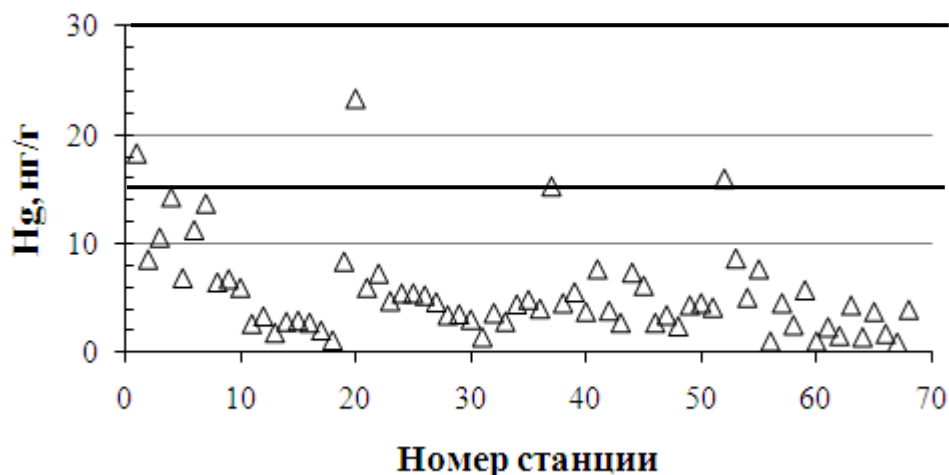


Рис. 8. Уровни содержания ртути в грунтах мангровых зарослей Центрального и Южного Вьетнама. Черными линиями выделен диапазон фоновых концентраций ртути в грунтах прибрежных морских экосистем Бразилии.

Глава 4. Обсуждение результатов.

Биотический круговорот Hg определяется, в основном, миграцией ее элементарных форм, поэтому эффективность вовлечения металла в трофическую передачу будет зависеть от совокупности процессов, происходящих в абиотических компонентах (воде, взвешенном веществе, донных отложениях) водных экосистем и способствующих ее метилированию [Ullrich et al., 2001].

В поверхностных водах органическое вещество и гидроокиси железа являются главными переносчиками ртути, они контролируют подвижность и биодоступность металла [Cossa et al., 1994; Ullrich et al., 2001]. Роль органического вещества в биодоступности Hg до конца не ясна. С одной стороны, органический углерод может повышать метилирование, стимулируя деятельность гетеротрофных микроорганизмов. С другой, благодаря комплексообразованию металла с органическими лигандами, РОВ при высоких концентрациях может снижать биодоступность ртути для бактерий [Driscoll et

al., 1995]. Известно, что природные уровни РОУ не оказывали влияние на процесс метилирования, но усиливали растворимость металлоорганических форм ртути [Miskimmin, 1991].

Установленная в данной работе корреляция между взвешенными формами Hg и железом в водотоках провинции Кхань Хоа позволяет предположить, что процесс их поступления в водные объекты может быть взаимосвязан. Важная роль в формировании микрокомпонентного состава природных вод принадлежит почвенному покрову водосборной территории [Добровольский, 2004], основную площадь которой занимали желтые и красные подзолистые почвы (до 65%), с небольшими участками аллювиальных почв в нижнем течении р. Кай [Департамент сельского хозяйства провинции Кхань Хоа, 2008]. Данные почвы относятся к латеритным корам выветривания и характеризуются высоким содержанием железа, алюминия, марганца и других металлов [Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains, 1992]. Массопоток тяжелых металлов в водоемы обусловлен водным стоком. Атмосферные осадки, промывая почвенную толщу, смывают с ее поверхности частицы и одновременно вовлекают в водную миграцию сорбированные на них тяжелые металлы [Добровольский, 2004].

В зонах смешения речных и морских вод происходит взаимодействие разнотипных водных масс, сопровождающееся развитием пространственной неоднородности среды [Bianchi, 2007], формированием биогеохимических барьеров [Лисицын, 1994] и преобразованием миграционных свойств химических элементов. С повышением солёности воды увеличивается относительная геохимическая подвижность (Me^P/Me^B) микроэлементов и как следствие увеличивается их биодоступность [Дёмина, 2010].

В водных экосистемах донные отложения являются основным местом депонирования многих макро- и микроэлементов. Однако в результате физико-химических, гидрологических и биологических процессов, происходящих в водоемах, последние могут вновь поступать в водную толщу [Sabadini-Santos et al., 2009]. В зависимости от соотношения скоростей процессов седиментации и регенерации химических веществ в осадках, они выходят из биотического круговорота или многократно участвуют в нем, таким образом, аккумуляция элементов в грунтах, служит важным фактором их биогеохимического круговорота [Martin, Meybeck, 1979].

Органическое вещество в грунтах, как и в водном столбе, является одним из главных компонентов, контролирующих подвижность и биодоступность ртути, поэтому максимальные концентрации металла регистрируются в

отложениях, богатых органикой [Kolka et al., 1999]. Качественный состав органического вещества в грунтах определяется исходным материалом, поступающим в осадки, а также интенсивностью антропогенной нагрузки [Пересыпкин, Романкевич, 2010; Teisserenc et al., 2010].

Терригенный органический материал играет важную роль в динамике ртути между водоразделами и водоемами в умеренных и северных широтах [Kollka et al., 1999; Ouellet et al., 2009]. Проведенные исследования демонстрируют правомерность данного положения и для тропических водоемов Вьетнама. Локальное повышение концентрации металла в грунтах связано с его привнесением с суши. В свою очередь, характер захоронения органического материала в донных отложениях может оказывать прямое воздействие на миграционные свойства ртути в водоеме [Gagnon et al., 1997]. Постоянное поступление в осадки большого количества трудноразлагаемой органики и как следствие повышение потребления кислорода для ее окисления постепенно приводят к формированию анаэробных условий на границе раздела вода/донные отложения, которые способствуют возрастанию подвижности и потенциальному метилированию неорганической ртути [Cossa, Gobeil, 2000].

Неотъемлемым элементом тропических экосистем являются мангровые заросли. Это естественные природные переходные зоны между сушей, рекой и морем, где происходят важные биогеохимические изменения видообразования, перераспределения и накопления многих микроэлементов и загрязняющих веществ [Sabadini-Santos et al., 2009]. В таких областях поддерживаются благоприятные условия для аккумуляции различных загрязняющих веществ, особенно тяжелых металлов [Jonathan et al., 2010]. Благодаря большому количеству подземных и воздушных корней, в местах своего произрастания мангры способствовали эффективному накоплению ртути в верхних горизонтах почво-грунтов бухты Дам Бай.

В сложноорганизованных и многокомпонентных трофических сетях, формирующихся в водных экосистемах и придающих им стабильность и устойчивость, рыбы представляют собой чаще всего консументов высшего порядка [Павлов, Касумян, 2002]. Поэтому для оценки отклика экосистемы на поступление металла в водоемы наиболее часто используют уровни содержания ртути в мышечной ткани рыб [Wiener et al., 2002].

В проведенном исследовании не установлено статистически значимых зависимостей содержания металла в мышечной ткани рыб от его концентрации в воде или донных отложениях, что косвенным образом свидетельствует о поступлении ртути преимущественно с пищей. Поглощение различных форм

Hg рыбами происходит через жабры и пищеварительный тракт. При этом в природных условиях последний путь наиболее эффективен – на его долю приходится > 90% от валового поступления метилртути в организм рыб [Boudou et al., 1991].

Накопление ртути в тканях рыб зависит от их размера, рациона питания и положения в пищевой цепи [Morel, 1998]. Полученные значительные межвидовые различия в уровнях содержания металла в мышечной ткани рыб из р. Кай, отражают их пищевую дифференциацию. Наиболее отчетливо эта связь прослеживается при объединении рыб в экологические группы по типам питания [Павлов, Касумян, 2002]. Хищничество способствует более интенсивному накоплению металла, хищники (например, *Channa gachua*, *Ch. striata*, *Xenotodon cancila* и др.) содержат большее количество Hg по сравнению с мирными видами (*Oreochromis niloticus*, *Mystacoleucus marginatus*) [Grieb et al., 1990; Wiener et al., 2002]. У эврифагов содержание Hg в пище и соответственно скорость накопления металла могут увеличиваться с возрастом, причем ускоряясь внезапно, когда рыба становится достаточно крупной, чтобы перейти от питания беспозвоночными на активную добычу более мелкой рыбы [Mathers et al., 1985]. Установленный в данном исследовании широкий диапазон внутривидовых колебаний содержания металла может определяться возрастом особи, ее миграционными особенностями и местонахождением объектов питания. На процессы бионакопления также могут влиять особенности онтогенетического развития рыб, смена спектра и типа питания на разных этапах жизненного цикла [Barbosa et al., 2003]. Как правило, содержание Hg в теле самок более высокое, чем самцов, поскольку им необходимо потреблять большее количество пищи, чтобы покрывать энергетические затраты на производство икры, и лишь небольшая часть металла переносится в икру и выводится из организма во время нереста [Nicoletto, Hendricks, 1988].

Анализ факторов, определяющих накопление тяжелых металлов в гидробионтах, выявил возрастную изменчивость их содержания у многих видов животных [Wiener et al., 2002]. Однако только для пяти из 12 видов, выловленных в р. Кай, установлена достоверная положительная связь концентрации Hg в мышечной ткани с массой особи. Имеющиеся на сегодняшний день в литературе данные противоречивы. Отсутствие корреляции между содержанием ртути и массой особей отмечено для *Cichla* spp. из р. Рио Мадейра и озер северной части бассейна Амазонки [Fostier et al., 1999]. Описывается достоверная положительная корреляция для *Cichla* spp. и

трахиры *Hoplias malabarius* из рек Тапажос и Рио-Негро (Бразилия) [Brabo et al., 2000; Castilhos et al., 2001]. Однако для этих же видов рыб сообщается и об отрицательной связи рассматриваемых параметров [Lima et al., 2000].

Проведенное сравнительное изучение уровней ртути в змееголове (*Channa striata*) из разных водоемов провинции Кхань Хоа и имеющиеся в литературе данные о более высоком содержании металла в рыбе из водохранилищ позволяют сделать вывод, что это типичное явление для искусственных водоемов разных климатических зон [Brouard et al., 1990]. По мере их «старения» и повышения трофности, содержание Hg в рыбе снижается [Verta, 1990].

Несмотря на наличие многих факторов, способствующих формированию пространственных, временных и межвидовых различий, для исследованных водоемов и водотоков тропического Вьетнама прослеживается четкая закономерность – уровни содержания ртути в мышечной ткани рыб существенно ниже по сравнению с другими регионами мира [Mercury pollution ..., 1994].

Данные особенности не могут быть объяснены различиями в количестве металла, поступающего и циркулирующего в экосистемах [Black et al., 2011], поскольку азиатский регион в настоящее время испытывает более высокие уровни антропогенной нагрузки [Li et al., 2011].

Вовлечение металла в биотический круговорот зависит от физико-химических параметров среды, влияющих на процессы ме-(де-) метилирования и эффективность аккумуляции Hg гидробионтами [Ullrich et al., 2001]. Принимая во внимание большое количество исследованных нами водных объектов, значительно различающихся по уровню минерализации, содержанию ртути в воде и донных осадках, концентрации хелатирующих агентов, а также по уровню трофности и содержанию биогенных элементов [Gusev, Nguyen Thi Hai, 2009], данные факторы не могут в полной мере объяснить более низкие концентрации металла в рыбе из водоемов Центрального и Южного Вьетнама.

Биогеохимические циклы химических элементов в различных экосистемах в значительной степени определяются биотой, особенно первичной продукцией и интенсивностью микробиологических процессов. Общеизвестно, что трофическая передача ртути вдоль пищевых цепей является основным путем ее накопления в гидробионтах, занимающих более высокое трофическое положение [Bloom, 1992], поэтому особенности организации тропических экосистем, на наш взгляд, могут частично объяснить данное явление.

В тропиках биота рек и озер, не включая рыб, как правило, не считается более сложной, по сравнению с водными объектами умеренной зоны. Здесь редко встречаются представители крупноразмерных видов зоопланктона, которые широко распространены в водоемах умеренных широт, а если и присутствуют, то в небольшом количестве и гораздо меньшего размера. Размерные характеристики особи влияют на объемы потребляемой ею пищи. Для поддержания жизнедеятельности некрупным особям необходимо меньшее количество энергии и соответственно они потребляют меньше корма [Osborne, 2000]. В условиях повышенной продукции биомассы фитопланктона консументы более высокого порядка часто не в состоянии потребить все количество пищи. Отмирание организмов и их оседание на дно может привести к выведению определенного количества металла из водного столба [Montgomery et al., 2000].

Водоемы тропического Вьетнама характеризуются очень высоким видовым разнообразием ихтиофауны, что обеспечивает высокую разветвленность пищевых сетей [Dudgeon, 2000]. Последнее, в свою очередь, может способствовать эффективному «рассеиванию» в них металла.

В целом, для живых организмов тропических областей характерны быстрые темпы роста, что также способствует накоплению меньшего количества ртути [Osborne, 2000]. В условиях быстрорастущей популяции, темпы роста организмов способны превышать скорость поглощения металла, что приводит к уменьшению количества накопленной Hg [Sunda, Huntsman, 1998].

Для водоемов умеренных и северных широт, в которых отмечены более высокие уровни содержания ртути в мышечной ткани рыб, прослеживались противоположные изменения. Происходило упрощение структуры сообществ и организации трофической сети, снижение суммарной биомассы планктона, увеличение размерных характеристик и степени доминирования, уменьшение видового разнообразия рыб (до 1-2 видов) [Корнева, 1994; Степанова, Комов, 2004; Лазарева, 2008].

Выводы

1. Концентрация общей ртути в поверхностном слое воды исследованных водоемов варьирует в пределах от 10 до 50 нг/л. Содержание ртути в донных осадках изученного региона не равномерно, концентрация металла в грунтах изменяется от 1.5 до 100 нг/г. Коэффициенты биологического накопления Hg в рыбе варьируют от 6.7×10^3 до 3.3×10^6 .

2. Ведущую роль в накоплении ртути в теле пресноводных тропических рыб играет тип питания. Для Центрального и Южного Вьетнама характерны более низкие уровни содержания ртути в мышечной ткани рыб по сравнению с водоемами умеренных и северных широт.

3. Терригенное органическое вещество может являться важным источником поступления ртути в донные отложения.

4. Развитие мангровых зарослей в литоральной зоне моря способствует эффективному накоплению металла в верхнем горизонте почво-грунтов.

5. В водных экосистемах Вьетнама ртуть мигрирует преимущественно в растворенной форме (от 60 до 90% общего содержания). Относительная геохимическая подвижность Hg увеличивается с ростом доли растворенного органического углерода и солености воды и уменьшается при увеличении содержания железа.

Список опубликованных работ:

Статьи в изданиях перечня ВАК РФ

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

2. Лобус Н.В. Роль линьки в процессе выведения ртути из организма речного рака *Astacus leptodactylus* L. при ее поступлении с кормом // **Токсикологический вестник**. 2009. № 4. С. 39-43

3. Иванова И.Ю., Томилина И.И., Гремячих В.А., Гапеева М.В., Довгаль Е.Ю., Лобус Н.В. Токсикологическая оценка качества донных отложений водоемов Оренбургской области // **Биология внутренних вод**. 2008. № 2 (приложение). С. 4-12.

Статьи в прочих изданиях

4. Лобус Н.В., Пересыпкин В.И., Гусев Е.С. Особенности водной миграции ртути в водотоках Южного Вьетнама (на примере рек Кай, Кхе, Кау, Зау) // IV Международный симпозиум «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах». Санкт-Петербург. 2011. 19-23 сентября. С. 187-190.

5. Лобус Н.В., Пересыпкин В.И., Шульга Н.А. Роль терригенного органического материала в поступлении ртути в донные отложения разреза река-эстуарий-море (на примере реки Кай и залива Нячанг Южно-Китайского моря) // XIX Международная школа-конференция по морской геологии «Геология океанов и морей». Москва. 2011. 14-18 ноября. С. 236-239.

6. Лобус Н.В., Комов В.Т., Нгуен Тхи Хай Тхань. Содержание ртути в воде и донных отложениях водоемов Центрального Вьетнама // Международный

Симпозиум «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» ГЕОХИ РАН. Москва. 2010. 7-9 сентября. С. 143-145.

7. **Лобус Н.В.** Ртуть в системе вода – взвешенное вещество – донные отложения (на примере водоемов Центрального Вьетнама) // Школа-конференция молодых ученых «Биология внутренних вод». Борок. 2010. 14-19 октября. С. 78-79.

8. Комов В.Т., Гремячих В.А., Камшилова Т.Б., **Лобус Н.В.** Содержание ртути в мышцах окуня из озер Полистово-Ловатского верхового болотного массива // Труды государственного природного заповедника «Рдейский». Выпуск 1. 2009. С. 102-116.

9. Komov V.T., Gremiachikh V.A., **Lobus N.V.** Mercury content in perca (*Perca fluviatilis* L.) from large lake of European Russia // Second symposium European Large Lake. Norrtelje. Sweden. 2009. 9-20 August. P. 56-58.

10. **Лобус Н.В.**, Мишина Е.Е., Чанг Конг Хуан. Содержание ртути в мышцах рыб с различной паразитарной инвазией в экосистеме тропической реки (Центральный Вьетнам) // Всероссийская конференция «Организмы, популяции, экосистемы: проблемы и пути сохранения биоразнообразия». Вологда. 2008. 24-28 ноября. С. 89-91.

11. **Lobus N.V.**, Gremiachih V.A., Gapeeva M.V. Mercury distribution in ecosystems components of stratified karst lakes in Central Russia // III Intern. Sci. Conf.: «Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, water quality». Minsk. 2008. 17-22 September. P. 201-202.

12. Комов В.Т., Гремячих В.А., **Лобус Н.В.** и др. Содержание ртути в представителях массовых видов позвоночных животных, относящихся к разным таксономическим и трофическим группам // III Всероссийская конференция «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Борок. 2008. 11-16 ноября. С. 162-165.

13. Комов В.Т., Гремячих В.А., **Лобус Н.В.** Современные методы оценки ртутной нагрузки на водные экосистемы // III Всероссийская конференция «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Борок. 2008. 11-16 ноября. С. 245-247.

14. **Лобус Н.В.** Использование коэффициента биомагнификации при оценке состояния водных экосистем // Международная конференция «Естественные и инвазийные процессы формирования биоразнообразия водных и наземных экосистем». Ростов-на-Дону. 2007. 5-8 июня. С. 144-145.

15. **Лобус Н.В.** Влияние ртутьорганических соединений природного происхождения на весовой рост водяного ослика *Asellus aquaticus* (Isopoda, Asellidae) // Международная конференция «Ломоносов – 2007». Москва. 2007. 14-18 апреля. С. 143-145.