

*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 10<sup>00</sup> 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](http://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**

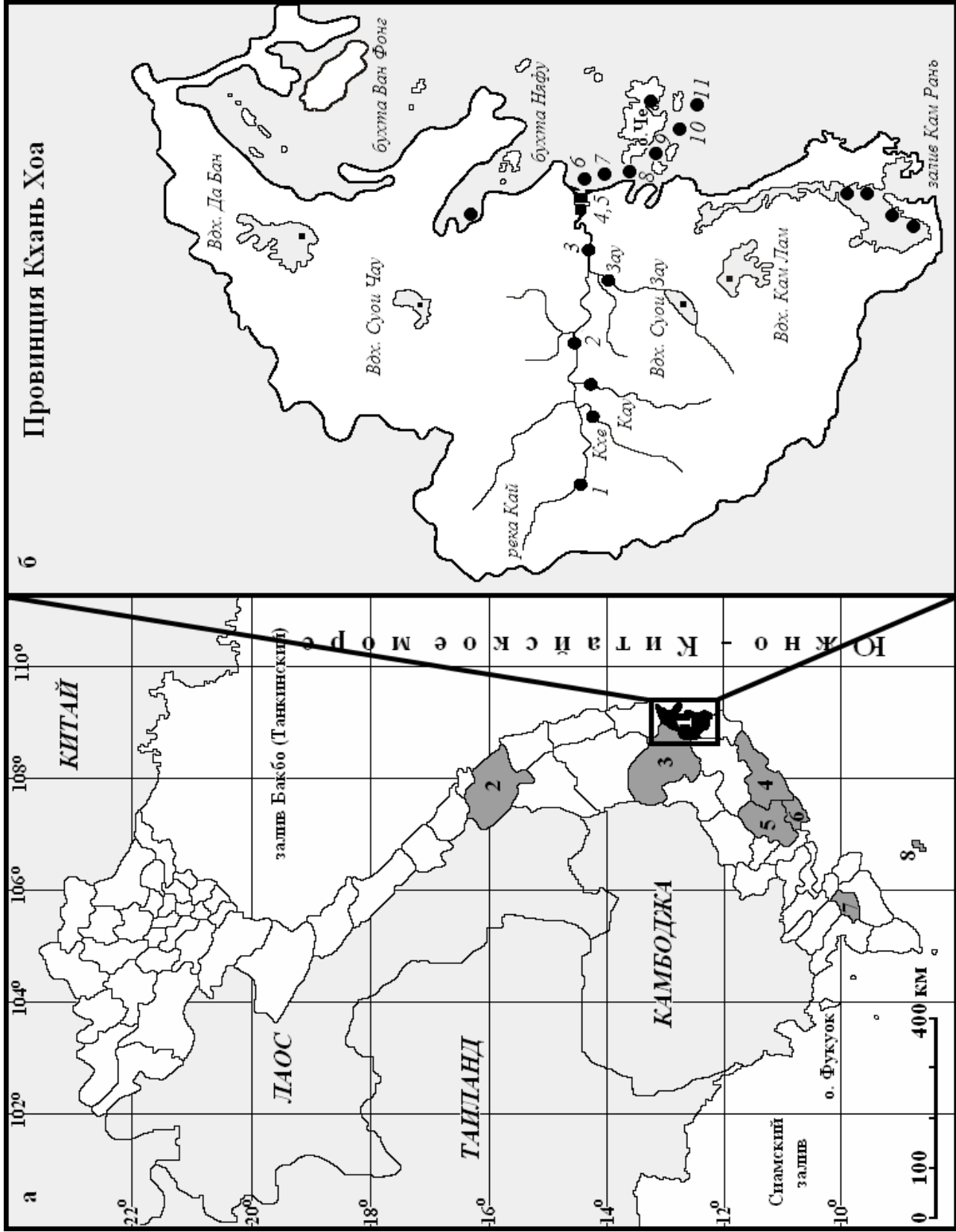
#### *2.1. Краткая физико-географическая характеристика района исследований*

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

**1б.** Провинция Кхвань 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.
<b>Всего: <math>\Sigma</math>1532</b>	<b>206</b>	<b>206</b>	<b>180</b>	<b>940</b>	

## 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 +60<sup>0</sup>С, 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 -15<sup>0</sup>С, 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**

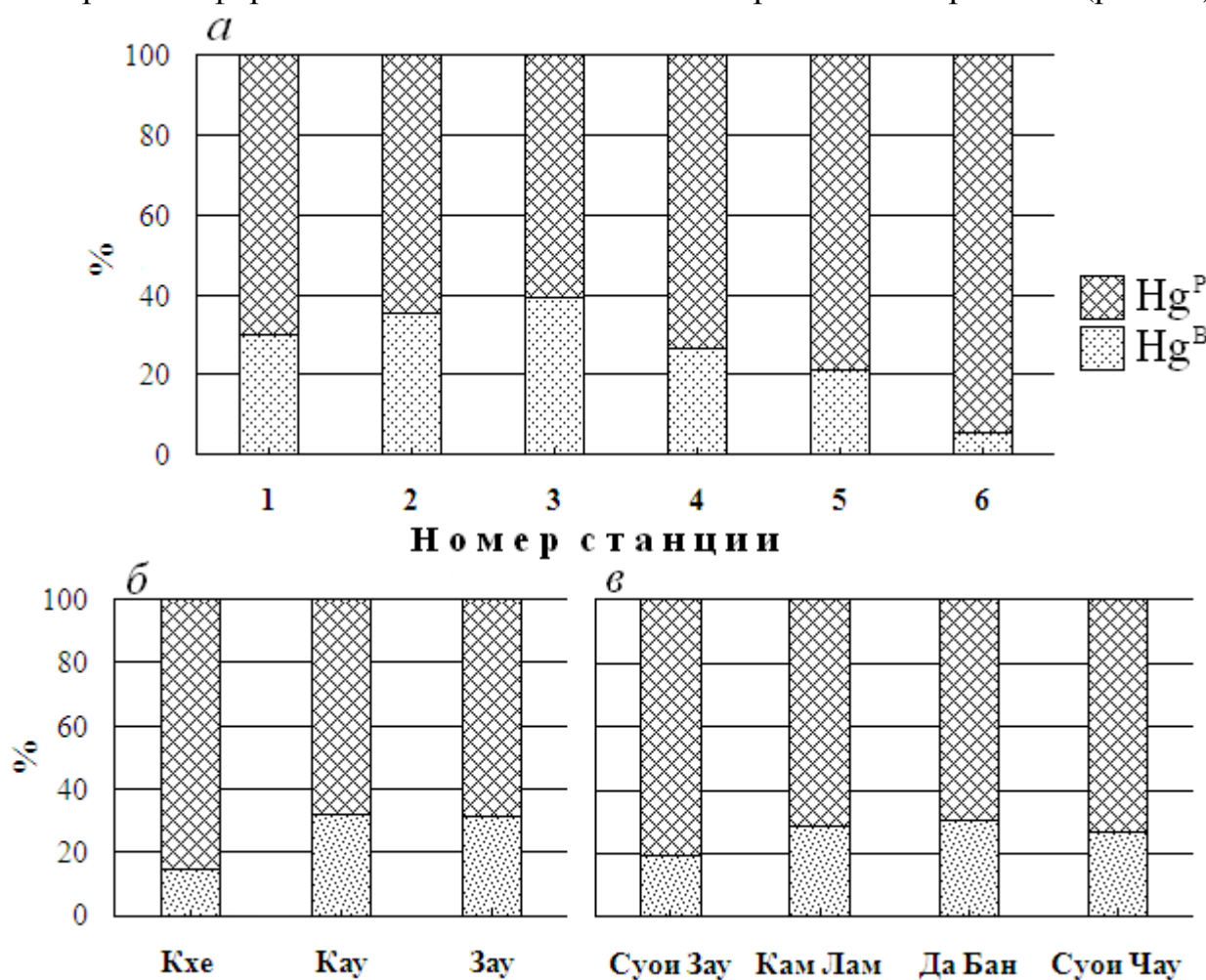
### *3.1. Водная миграция и уровни содержания ртути в водоемах и водотоках провинции Кхань Хоа*

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*.

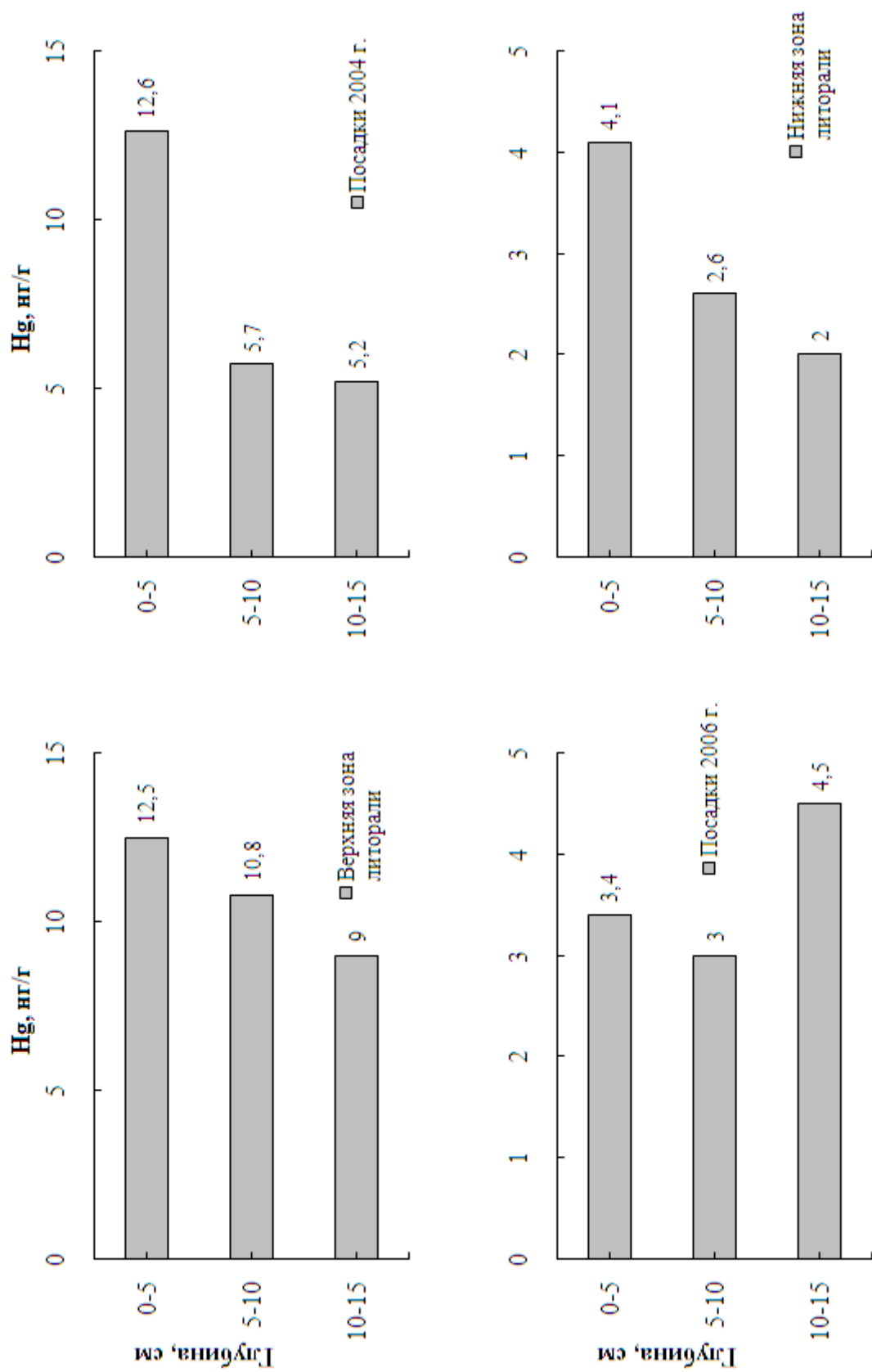
С помощью молекулярных биомаркеров органического вещества оценена роль терригенного материала в поступлении Hg в водные экосистемы. Концентрация металла достоверно возрастала с увеличением содержания длинноцепочечных углеводородов ( $\sum C_{23}-C_{35}$  - *n*-алканы, маркёры терригенного ОВ) ( $r= 0.82, p<0.01$ ). 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 тиляпии *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.



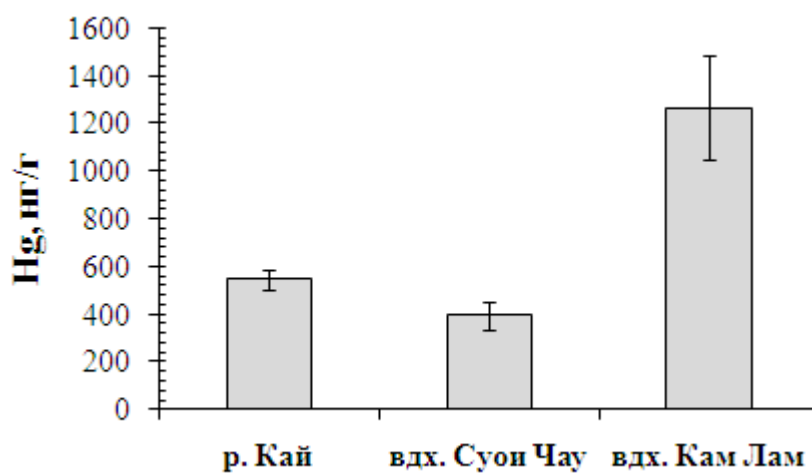
**Рис. 3.** Горизонтальное и вертикальное распределение ртути в грунтах литорали бухты Дам Бай.

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).

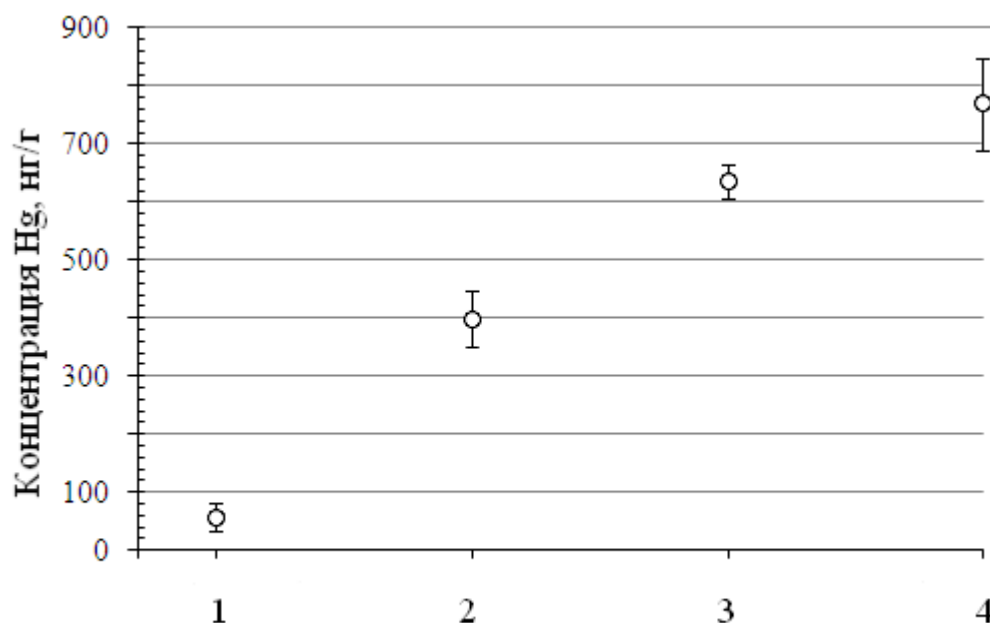


**Рис. 4.** Содержание ртути в мышечной ткани змееголова *Channa striata* из водных объектов провинции Кхань Хоа.

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*, *Xenotodon 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.



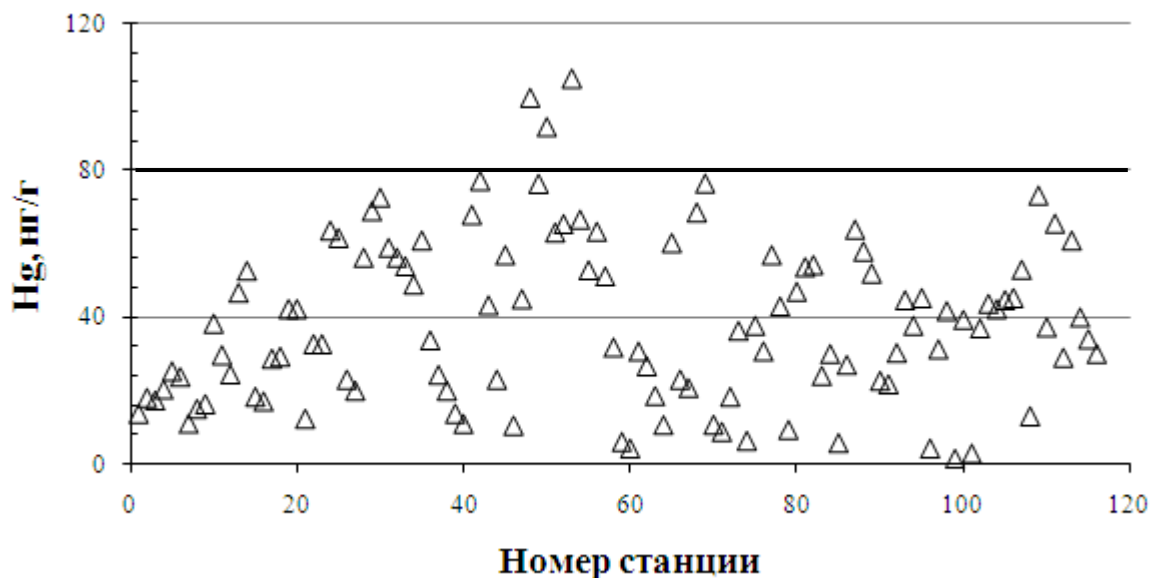
**Рис. 5.** Содержание ртути в мышечной ткани рыб с разным типом питания (различия достоверны при  $p < 0.001$ ). 1- фитобентофаги ( $n=26$ ), 2 - планктофаги ( $n=26$ ), 3 - зоофаги (факультативные хищники) ( $n=237$ ), 4 - эврифаги ( $n=108$ ).

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)

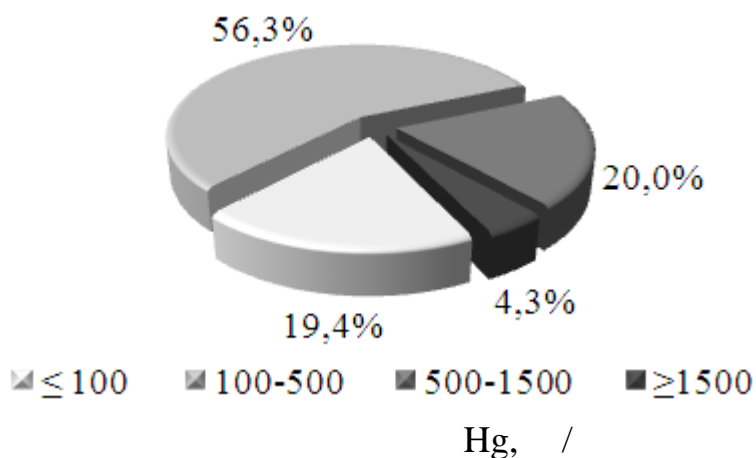
Концентрация ртути в донных отложениях водоемов Центрального и Южного Вьетнама изменялась в широких пределах – от 1.5 до 110 нг/г. Однако

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  $6.7 \times 10^3$  до  $3.3 \times 10^6$ . Однако только у 4.3% особей от общего объема выборки (940 экз.) концентрация металла была  $\geq 1500$  нг/г, при этом 19.4% рыб содержали в мышечной ткани  $\leq 100$  нг Hg/г, а отдельные экземпляры  $< 10$  нг Hg/г (рис. 7).

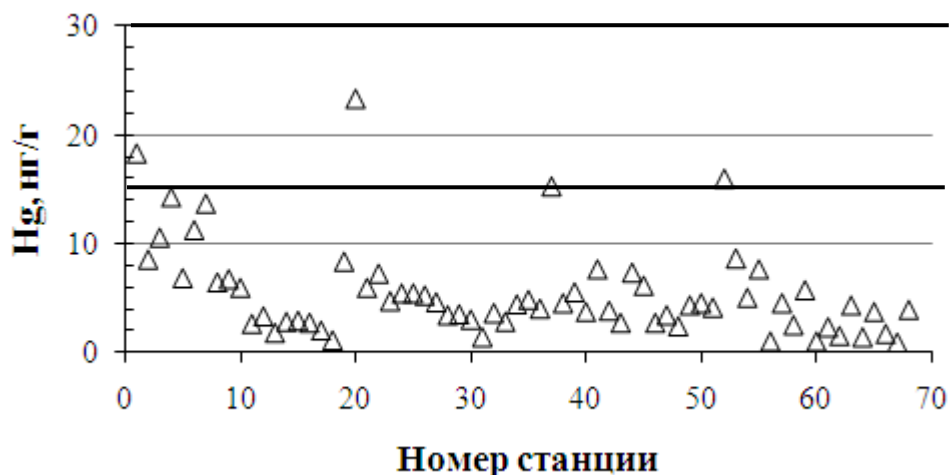


**Рис 7.** Процентное распределение рыб из водоемов Центрального и Южного Вьетнама с различным содержанием металла.



### 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 солености 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 [Kolka 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  $6.7 \times 10^3$  до  $3.3 \times 10^6$ .

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.