

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЕТАЛЛОИДЫ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ В РЕКАХ БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА КАНЗЁ (ВЬЕТНАМ)¹

© 2023 г. Н. Н. Терещенко^{а, *}, О. Д. Чужикова-Проскурнина^а,
В. Ю. Проскурнин^а, Нгуен Чонг Хиен^б

^аФИЦ “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского”,
Севастополь, 299011 Россия

^бСовместный Российско-Вьетнамский Тропический исследовательский научный
и технологический центр (Южное отделение),
Хошимин, 740500 Социалистическая Республика Вьетнам

*e-mail: ntereshchenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 30.10.2022 г.

Проведены хемозоологические исследования акваторий рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё (Вьетнам). Методом масс-спектрометрии определены концентрации 15 микроэлементов – тяжелых металлов и металлоидов – в воде и донных отложениях. Установлено, что в общем уровне поллютантов не высоки в реках Канзё. Но отмечено, что концентрации ряда тяжелых элементов в единичных случаях превышают предельно допустимые при кратковременном воздействии, также неоднократно превышен предел безопасных концентраций по нескольким элементам и при хроническом воздействии. Концентрации ряда тяжелых элементов составляют от 30 до 80% ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Прежде всего это такие элементы, как медь, цинк, мышьяк, ванадий, железо, молибден. Установлено, что, согласно Регламенту Вьетнама, в водах исследованных акваторий были превышены нормативные показатели для источников категории А1 по концентрации взвешенного вещества в воде, а концентрация растворенного кислорода в воде была ниже норматива. Полученные результаты указывают на необходимость мониторинга хемозоологического состояния акваторий рек в Канзё как водных природоохраненных объектов, которые также ограничительно используются в социально-хозяйственных целях.

Ключевые слова: Биосферный заповедник Канзё, реки Кагау и Лонгтау, тяжелые металлы и металлоиды, вода, донные отложения.

DOI: 10.31857/S0321059623020153, EDN: IQRTCA

ВВЕДЕНИЕ

Хемозоологические исследования речных систем и оценка экологического качества вод, отслеживание направленности изменений химического состава вод, определение фоновых природных уровней химического состава вод в районах, мало подверженных антропогенному влиянию, имеет важное научное и практическое значение. Полученные результаты призваны обеспечить формирование научных основ рациональной системы мониторинга, оценки экологического со-

стояния акваторий и прогноза тенденций его изменения.

Сохранение и поддержание экологического качества вод в акваториях рек – залог обеспечения безопасного рационального использования природных ресурсов рек и сохранения целостности этих экосистем, их биологического разнообразия и природного продукционного потенциала. Одна из главных угроз флоре и фауне юго-восточной Азии в последнее время – изменение химического состава вод, которое включает в себя как техногенное загрязнение, так и прогрессирующее засоление речных вод, что повышает актуальность научных исследований именно в водотоках, подверженных засолению. В настоящее время происходит усиление осолонения вод в такой важной для Вьетнама речной системе, как

¹ Исследование выполнено в рамках НИР Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (тема “Эколан Э-3.4”) и госзадания ФИЦ (тема “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН”, государственная регистрация 121031500515-8).

дельта р. Меконг [13, 24, 27]. В основном, это происходит за счет антропогенного влияния — регулирования речного стока реки в соседних, расположенных выше по течению Меконга, странах. Но сказывается влияние и других антропогенных и природных факторов, в частности — глобального изменения климата [8, 27, 29, 34]. Это представляет большую проблему для многих стран региона, так как реки играют важную роль в социальной и экономической жизни Вьетнама и других стран юго-восточной Азии. Во Вьетнаме и других развивающихся странах усиленное промышленное развитие, концентрация населения в больших городах и отсутствие в большинстве случаев достаточной степени очистки стоков промышленных предприятий и урбанизированных территорий приводит к повышению содержания токсичных веществ в воде рек, в том числе и тяжелых металлов, что представляет угрозу биологическому разнообразию водных экосистем [12, 21, 26–28]. Поэтому хемотрологические исследования имеют общебиологическое значение. Кроме того, изменение видового разнообразия в речных экосистемах влияет на хозяйственное использование, прежде всего продовольственных ресурсов: уходят из засоленных участков традиционно добываемые или выращиваемые виды гидробионтов, возникают необходимость репрофилирования аквахозяйств и другие проблемы, связанные с ухудшением качества природных вод, которые используются для питьевых нужд, сельского хозяйства и других целей.

Поэтому авторами проводились исследования в Вьетнаме в реках Канзё — биосферного заповедника, который расположен в зоне мангровых зарослей [25]. Заповедник Канзё расположен на юго-востоке Вьетнама в восточной части п-ова Индокитай. Заповедник протянулся на 40 км и занимает территорию от юго-восточных пригородов г. Хошимина до побережья Южно-Китайского моря, где простирается в прибрежной зоне на сравнительно недавно образованных эстуарных комплексах рукавов рек Вамко, Сайгон и Донгнай. Географические координаты заповедника — $10^{\circ}22' - 10^{\circ}40'$ с.ш., $106^{\circ}46' - 107^{\circ}01'$ в.д. Площадь заповедника — 75740 га. Большая часть территории занята мангровыми зарослями, также солеными и илистыми болотами на почвах, сформированных аллювиальными отложениями рек. Согласно концепции зонирования заповедников, его площадь разделена на три основные зоны, км²: ядро — 47.21, буферная зона — 411.39 (из них 38 — акватории), зона сотрудничества — 298.8 (из них 5.7 — акватории).

В Канзё в речные системы во время приливов заходит вода Южно-Китайского моря, что привело к устойчивому засолению речных водотоков. Антропогенное воздействие в 1965–1975 гг. было очень сильным, это был район активных бо-

евых действий. Создание биосферного заповедника в Канзё позволило не только восстанавливать и сохранять мангровые заросли с их уникальной флорой и фауной, но и оградить водные экосистемы от избыточного антропогенного влияния. Тем не менее с водным стоком и атмосферным переносом антропогенные вещества могут поступать в водотоки Канзё из близлежащего региона — г. Хошимина — самого крупного промышленного центра южной части Вьетнама [4, 21, 30]. Резерват включает в себя территорию от юго-восточных пригородов г. Хошимина до побережья моря [25]. Территория заповедника низменная с множеством пересекающихся водотоков. Климат типичный тропический. В южной части два сезона — влажный (сезон дождей) летом и сухой зимой, весна и осень — промежуточные периоды. Самые дождливые месяцы — июнь и август. Среднегодовая температура +27°C. Питание рек в большей степени дождевое, поэтому в сезон дождей нередко случаются наводнения, а сезон на реках приходится на сухой сезон. Все водотоки заповедника впадают в Южно-Китайское море и подвержены приливам и отливам [1, 3, 23].

Первоочередное влияние на хемотрологическое состояние водных экосистем в южной части Вьетнама, наряду с засолением, оказывают опасные токсиканты, к которым относятся тяжелые металлы (ТМ) и металлоиды (МЛ) [21, 29–31]. Ранее выполненные исследования показали, что концентрации ТМ в донных отложениях (ДО) рек многократно превышали таковые в воде [9, 12]. Исследования химического состава, включая ТМ, вод рек и ДО проводились в разных регионах Вьетнама: в рукавах дельты реки Меконг, в реке Шерепок, в промышленных районах северной части страны: в реке Толинь, в сточных водах шахт по добыче каменного угля и наиболее широко в реках в южной части Вьетнама [7–9, 12, 21, 22, 24, 27–31]. На юге Вьетнама оценка экологического качества поверхностных вод выполнена на основании наблюдений на 58 точках. Результаты показали, что качество воды сильно различалось в зависимости от мест отбора проб. Наиболее загрязненные районы, в том числе и по содержанию ТМ, находятся в регионе Донгнай, Хошимин и Лонган, где высокая навигационная активность, развитая промышленность и рыболовные порты [30]. Но район Канзё и реки, протекающие по его территории, не были охвачены этими исследованиями. Сегодня реки Канзё за пределами ядра биосферного заповедника продолжают служить как транспортный, производственный, водный и туристическо-рекреационный важный ресурс государства. Здесь развивается хозяйственная деятельность, в частности — массовое распространение аквакультурных хозяйств по выращиванию моллюсков, а также вылов рыбы и других гидробионтов [25]. Поэтому исследо-

вание хемозекологического состояния речных водотоков Канзё актуально для их оценки как важных природоохранных и социально-хозяйственных объектов. Значимо также использование этих рек в качестве модельных районов для исследования других рек Вьетнама, играющим очень важную роль в жизни страны и подвергающимся засолонению и антропогенному воздействию.

Особенность формирования химического состава речных вод Канзё определяется разветвленной сетью водотоков в заповеднике. С одной стороны, реки имеют традиционное питание с водосборного бассейна со стоком антропогенного и природного происхождения, а с другой – химические элементы поступают с морскими водами, которые во время приливов высоко поднимаются по руслам рек, вследствие чего сформировались соленые воды в этих реках. В рядом расположенном мегаполисе Хошимине развиты многочисленные виды промышленности, которые могут быть источниками загрязнения по ТМ и МЛ через аэрозольные выбросы, промышленные стоки. Это – металлургия, машиностроение, металлообработывающая, химическая, деревообрабатывающая промышленность, теплоэлектроэнергетика, производство пластмасс, резины, стройматериалов, электроники и др. [4, 16, 21, 26]. Свой вклад вносят и бытовые стоки города с населением более 9 млн человек, автомобильный, железнодорожный и водный транспорт [4]. В мангровых зарослях иловые ДО, которые способны накапливать различные элементы, также могут служить источником вторичного загрязнения речных вод в результате активных гидрологических процессов в период отливов и приливов, постоянного взмучивания и выноса ДО и ремобилизации химических элементов из ДО в водную массу.

В ранее проведенных исследованиях загрязнения рек анализ ТМ проводили с помощью атомно-адсорбционного спектрометра, и перечень определяемых элементов был разным в разных исследованиях: от 1 до 7 химических элементов, чаще всего ограничивающихся железом, кадмием, свинцом, мышьяком, цинком [7, 12, 21, 24, 31]. В настоящих исследованиях для измерения содержания элементов использовали масс-спектрометрический метод. В каждой пробе проводили определение 15-ти элементов ТМ и МЛ, среди которых – самые токсичные и приоритетные для традиционного мониторинга и рекомендованные для контроля в природных водах с учетом возможностей примененных аналитических методов анализа состава вод [11, 14, 17, 18]. Концентрации элементов в воде, как известно, в большей степени отражают состояние вод в текущий момент, а в ДО этот параметр представляет собой более консервативный показатель и дает интегральную ха-

рактеристику хемозекологического состояния акватории.

Поэтому на первом этапе работ целью исследования была первичная оценка экологического состояния акваторий двух рек – Кагау и Лонгтау – в Канзё в отношении отдельных физико-химических характеристик вод, ТМ и МЛ на основе изучения концентраций этих веществ в воде и ДО речных акваторий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Районы и материалы исследования

Исследования проводили в мае 2021 г. в биосферном заповеднике Канзё на двух реках: Лонгтау и Кагау (рис. 1). Пробы отбирали в межень – в период окончания и начала влажного сезона. Выбраны реки, расположенные на границе буферной зоны заповедника, одна из самых крупных рек – Лонгтау. Севернее Канзё к ЮВ от Хошимина р. Донгнай разделяется на 2 больших рукава, восточный рукав и есть р. Лонгтау (координаты истока реки $10^{\circ}40'10''$ с.ш.; $106^{\circ}47'24''$ в.д.). Площадь водосборного бассейна р. Донгнай составляет 38600 км^2 , водосборный бассейн собственно р. Лонгтау составляет $>6000 \text{ км}^2$. С восточной стороны Лонгтау огибает всю территорию заповедника Канзё. Река – важная транспортная артерия региона, проходит вдоль мангровых зарослей, достигая залива Южно-Китайского моря, длина ее русла составляет 75 км, средняя глубина 15 м с шириной русла от 0.5 до 2 км [6, 15, 16]. Вторая исследованная река – Кыадай – значительно меньший водоток, проходящий по внутренней территории Канзё (одно из ответвлений р. Лонгтау в Канзё), с извилистым руслом, мангровыми зарослями по берегам. Длина русла порядка 25 км, ширина русла несколько десятков метров, впадает в русло р. Лонгтау перед ее впадением в залив Ганрай Южно-Китайского моря. Пробы отбирали на двух небольших полигонах в руслах рек Кагау и Лонгтау, которые включали по 3 станции, размещенные поперек русла реки: две прибрежные и одна в центральной части русла (рис. 1). Исследованная акватория р. Кагау относится к внутреннему району Канзё, а полигон на р. Лонгтау находится в районе, смежном с морской акваторией зал. Ганрай. На р. Лонгтау во время наблюдений в период отлива–прилива перепад уровня воды составлял 28.2–34.5 м, а на р. Кагау – 4.5–9.0 м.

Пробы отбирали в двух повторах во время прилива и отлива (табл. 1) из поверхностного слоя пластиковым ведром, а на станциях в центре русла рек – пластиковым батометром в придонном слое вод. Для анализа ДО отбирали поверхностный (0–5 см) слой пластиковой трубкой. В точке 2.2 не удалось отобрать пробу ДО, так как

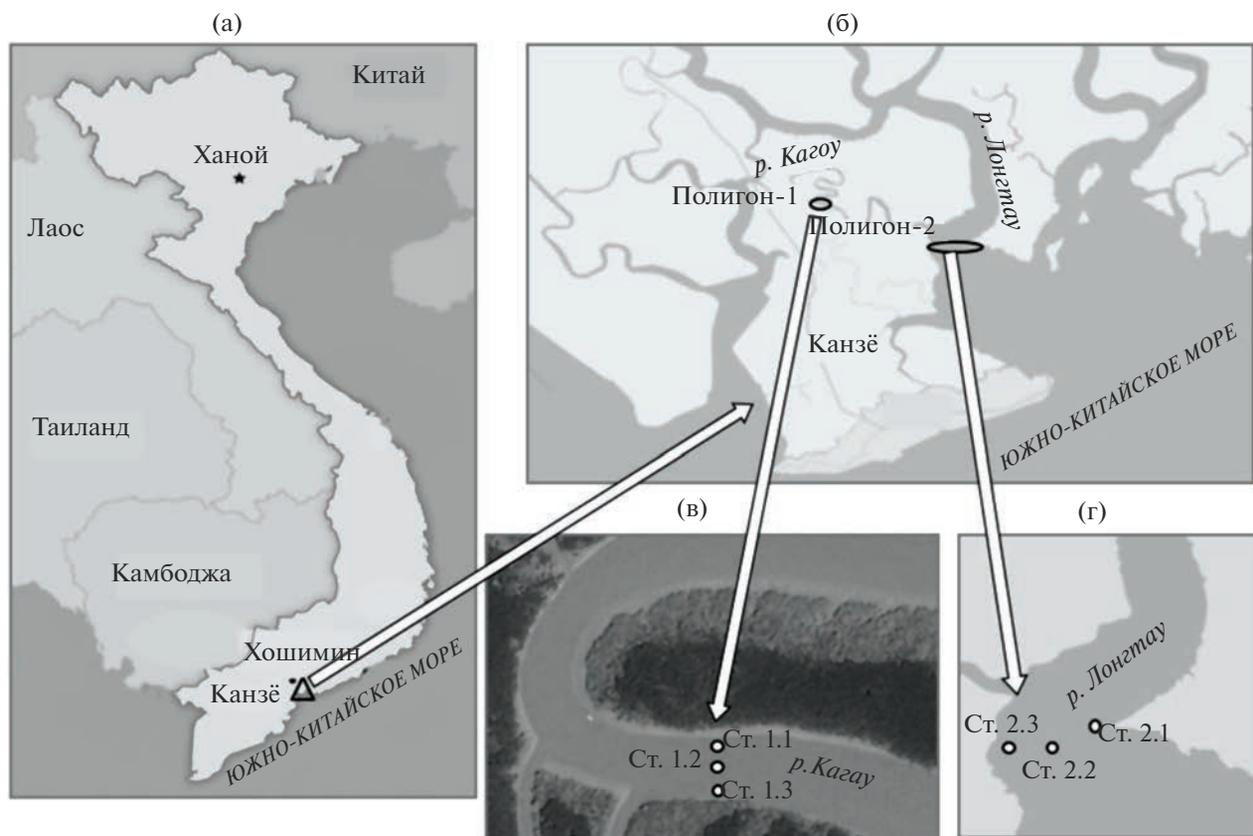


Рис. 1. Картограмма района отбора проб: а – местоположение п-ова Канзё, б – полигоны в акваториях рек, в – станции отбора проб на р. Кагау, г – станции отбора проб на р. Лонгтау.

ДО были представлены плотными песками, и пробоотборник поднимали на борт катера практически пустым. Отбор проб, определение металлов на станциях и измерение в природных условиях отдельных физико-химических параметров водной среды (рН, Eh, TDS, температура, солёность S и концентрация растворенного кислорода PO) выполняли с помощью измерительного многопараметрического прибора HI9829 (“HANNA”, Румыния) со встроенным GPS-навигатором для определения местоположения станций отбора проб. Эти полевые замеры, отбор проб и частично первичную предобработку проб осуществляли сотрудники лаборатории анализа окружающей среды Южного отделения Совместного Российско-Вьетнамского Тропического НИТЦ (ЮОТЦ) в г. Хошимине под руководством и при непосредственном участии Нгуен Чонг Хи-епа (Nguyen Trong Hiep). Сотрудники Института биологии южных морей (ИнБЮМ) выполняли в лаборатории ЮОТЦ первичную, термическую и частично химическую обработку проб, а также химическую обработку образцов в лабораториях ИнБЮМ в г. Севастополе, а также статистическую обработку и анализ полученных результатов. Измерение концентраций микроэлементов в

экстрактах проб ДО и воды проводили в Центре коллективного пользования (ЦКП) ИнБЮМ “Спектрометрия и хроматография”.

Методы исследования

В основу исследований положен метод хемоэкологического мониторинга с последующей первичной оценкой хемоэкологического состояния в акваториях путем сравнения полученных концентраций загрязнителей с нормативными: ПДК, национальными – Национальным техническим регламентом качества поверхностных вод во Вьетнаме (далее Регламент Вьетнама – РВ_{пв}), ПДК_{рх} – для водоемов рыбохозяйственного назначения (Российская Федерация) [20], ПДК_{кв} – при краткосрочном воздействии [35], пределом безопасных концентраций (ПБК_{хв}) – при хроническом воздействии (Нидерланды) [35]. В соответствии с Регламентом Вьетнама для поверхностных вод рассматривали показатели для источников категории А1 – для хозяйственно-бытового использования и сохранения флоры и фауны [32], использовали Регламент качества ДО для пресноводных, соленых и солоноватоводных донных отложений, который применяется для

Таблица 1. Координаты станций и виды отбора проб в акваториях рек Кагау и Лонгтау для определения ТМ и МЛ (L – прилив; R – отлив; П – поверхностная вода; Д – придонная вода)

Станция отбора проб	Координаты станций отбора проб		Виды проб		
	° с.ш.	° в.д.	вода	ДО, слой, см	
1.1 L	10.48859	106.89310	П	0–5 см	
1.2 L	10.48825	106.89331	П и Д		
1.3 L	10.48758	106.89233	П		
1.1 R	10.48841	106.89326	П		
1.2 R	10.48822	106.89346	П и Д		
1.3 R	10.48770	106.89254	П		
2.1 L	10.47134	106.94568	П		
2.2 L	10.47263	106.94114	П и Д		Нет
2.3 L	10.47557	106.93325	П		0–5 см
2.1 R	10.47114	106.94181	П	0–5 см	
2.2 R	10.46809	106.94664	П и Д	Нет	
2.3 R	10.47228	106.93646	П	0–5 см	

оценки и контроля качества ДО с целью защиты водной флоры и фауны во Вьетнаме (РВ_{до}) [33]. К критическим элементам относили ТМ или МЛ, концентрации которых превышали хотя бы один из нормативных показателей, а к потенциально критическим – элементы, концентрации которых составляли величины >30% от значения одного из нормативных показателей.

Определение микроэлементов: ТМ и МЛ

В пробах воды и ДО определяли следующие химические элементы: Ag, As, Be, Cd, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Se, Sb, Tl, V, Zn.

Для определения растворенных в воде микроэлементов пробы фильтровали через мембранные (диаметр пор 0.45 мкм) фильтры, и фильтрованную воду обрабатывали в лаборатории в соответствии с руководящим документом в двух повторностях [17]. Обработку проводили по методике для морских вод, так как в исследуемых акваториях S вод составляла 20–27 практических единиц солености (ПЕС). Метод пробоподготовки основан на экстракционном отделении и концентрировании следовых количеств микроэлементов с помощью диэтилдитиокарбаматов и четыреххлористого углерода CCl₄ с последующим измерением концентрации микроэлементов в подготовленных кислотных экстрактах проб на масс-спектрометре [11].

Пробы ДО взвешивали в состоянии природной влажности, сушили при 80°C до постоянного веса сухой массы пробы, гомогенизировали и отбирали аликвоту пробы весом 1 г в двух повторностях для анализа. Их химически обрабатывали в соответствии с нормативным документом [14].

Химическая обработка включала в себя минерализацию пробы путем кипячения образцов с азотной кислотой, разбавленной 1 : 1 деионизированной водой с добавлением перекиси водорода, и дальнейшего выпаривания до влажных солей. После этого проводили повторное растворение образцов в разбавленной азотной кислоте 1 : 9 и фильтрование через фильтровальную бумагу для медленной фильтрации. Затем фильтр, содержащий нерастворимый остаток, отбрасывали, отфильтрованный раствор разбавляли таким же раствором до объема 50 мл и образец тщательно перемешивали. Полученный раствор использовался для измерения концентрации микроэлементов на масс-спектрометре. Подготовленные экстракты микроэлементов измеряли в ЦКП ИнБЮМ “Спектрометрия и хроматография” на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) “Plasma Quant MS Elite” (“Analytik Jena AG”) [5, 10]. Концентрацию элементов в ДО выражали в мг/кг сухой массы осадка. Градуировка масс-спектрометра проводилась с использованием стандартного раствора “Калибровочный стандарт многоэлементный IV-28, HNO₃/HF, 125 мл” (“Inorganic Ventures”). Режим измерения на масс-спектрометре включал в себя 7 повторностей по 10 сканирований для каждого определяемого элемента от 10000 до 100000 мкс в зависимости от его ожидаемой концентрации. Вычисление и оформление результатов измерений выполняли согласно нормативным документам [5, 10, 17]. Средняя относительная ошибка определения концентрации микроэлементов составляла ≤±10% для всех исследованных ТМ и МЛ в образцах природных объектов.

Таблица 2. Физико-химические характеристики проб воды в акваториях рек Кагау и Лонгтау (*S*, нормативы качества вод по рН и РО, согласно РВ_{пв}) для источников категории А1 [32]

Дата, район отбора проб	Станция отбора проб	Физико-химические характеристики воды					
		рН ± 0.01	Eh ± 0.5, мВ	TDS ± 1, ppm	<i>S</i> ± 0.01, ПЕС	РО ± 0.001, мг/л	<i>T</i> ± 0.15, °С
		РВ _{пв} для источников категории А1					
		6–8.5	–		–	≥ 6	–
измеренные значения							
26.05.2021 г., полигон 1	1.1 L	7.38	–28.3	18680	23.54	–	30.00
	1.2 L	7.37	–27.8	18680	23.54	4.37	30.04
	1.3 L	7.24	–20.6	18210	22.89	4.11	29.86
	Среднее значение	7.33 ± 0.060	–25.6 ± 3.30	18523 ± 209	23.32 ± 0.290	4.24 ± 0.130	29.97 ± 0.070
	1.1 R	7.06	–10.3	17900	22.46	3.84	29.53
	1.2 R	7.07	–10.6	17980	22.57	3.94	29.57
	1.3 R	7.06	–10.1	17890	22.44	4.26	29.53
	Среднее значение	7.06 ± 0.003	–10.3 ± 0.17	17923 ± 38	22.49 ± 0.053	4.01 ± 0.163	29.54 ± 0.017
27.05.202 г., полигон 2	2.1 L	7.58	–39.8	20780	26.49	5.63	30.25
	2.2 L	7.52	–36.3	20480	26.07	5.62	30.28
	2.3 L	7.58	–39.7	20940	26.73	5.10	30.03
	Среднее значение	7.56 ± 0.022	38.6 ± 1.53	20733 ± 179	26.43 ± 0.240	5.45 ± 0.233	30.19 ± 0.103
	2.1 R	7.18	–17.1	16090	19.95	5.09	30.10
	2.2 R	7.30	–24.1	18050	22.67	5.18	29.59
	2.3 R	7.26	–21.4	17110	21.36	5.55	29.87
	Среднее значение	7.25 ± 0.043	–20.8 ± 2.02	17083 ± 96	21.33 ± 0.947	5.27 ± 0.183	29.85 ± 0.497

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические характеристики проб воды

Результаты полевых измерений физико-химических характеристик воды в исследованных акваториях рек представлены в табл. 2. Следует отметить, что вода изученных рек Канзё по уровню *S* соответствует соленым водоемам (табл. 2).

Концентрации РО в воде рек Кагау и Лонгтау на станциях (двух прибрежных и одной центральной) разных участков русел различались между собой, и в центральных точках они были как ниже, так и выше РО на прибрежных станциях. Возможно, что вариации этого показателя связаны с гидродинамическими условиями в акваториях и с оголением части прибрежных ДО в период отлива, возможны и другие причины. Выборка первичных наблюдений небольшая, и полученные данные не дают достаточно информации для обоснованных выводов. При этом из полученных данных видно, что на центральных

станциях в обоих руслах концентрация РО была выше в период прилива, чем в период отлива. На станциях полигона 2 (прилегающая к морским водам акватория) концентрации РО были всегда выше, чем на станциях полигона 1 (внутренний район заповедника), что может указывать на морские воды как на источник обогащения вод рек РО. Согласно РВ_{пв}, в изучаемых акваториях концентрация РО была ниже технического регламента для источников категории А1 [32]. Измеренные концентрации в акватории р. Кагау соответствовали РВ_{пв} для источников категории В1 (≥4) – для целей орошения, для источников категории В2 (≥2) – для навигации и других целей при небольшом количестве потребления. Показатель рН вод соответствовал требованиям для источников категории А1. Также наблюдали небольшие различия солености в реках Кагау и Лонгтау как между станциями, так и между периодами отлива и прилива. Небольшое осолонение вод (порядка 1 ПЕС) происходило в р. Кагау во время прилива

(полигон 1). На полигоне 2 наблюдали уменьшение солености вод во время отлива, оно составляло в среднем 5 ПЕС. Такие колебания солености согласуются с направленностью движения вод и полноводностью исследуемых рек во время приливо-отливных процессов и характеризуют устойчивое преобладающее влияние морских вод на соленость речных водных масс. В $PV_{\text{пв}}$ нормируется также количество взвешенного вещества, которое для источников категории А1 не должно превышать 20 мг/л. Этот норматив не превышался только на ст. 2.1. и 2.2. в период прилива и составлял 17 мг/л. Остальные измерения показали превышение норматива, особенно значительное в период отлива. На полигоне 1 (рис. 1) в период прилива концентрация взвешенного вещества составляла 20.3–32.7, в период отлива – 133.3–149.9 мг/л в поверхностной воде. В придонной воде в этот период она достигала 647.9 мг/л. На полигоне 2 в период прилива концентрация взвеси составляла 17.2–41.3, а в период отлива 208.1–10001.2 мг/л в поверхностной воде (рис. 1). В придонном слое она достигала 324.9 мг/л. Значительное увеличение концентрации взвешенного вещества в период отлива на полигоне 2 в р. Лонгтау в поверхностной воде обусловлено, очевидно, тем, что иловые ДО взмучиваются в реках в период прилива, особенно на литорали, а в период отлива увеличенное количество взвеси вместе с менее солеными речными водами (табл. 2) поступает в поверхностные воды устья р. Лонгтау. На р. Кагау в придонном слое наблюдали более высокие концентрации взвеси, чем в поверхностном слое, так как источником взвеси служит речная литораль, мангровые заросли и дно мелководного русла. В процессе вымывания приливным-отливным потоком вод взвесь поступает прежде всего в придонный слой, что и приводит к более высоким концентрациям взвеси в этом слое по сравнению с поверхностными водами в р. Кагау на полигоне 1, расположенном во внутреннем районе Канзё. В целом, нормативная концентрация взвешенного вещества в воде превышалась, как правило, в 2–50 раз. Более высокие концентрации взвешенного вещества на станциях полигона 2, чем на полигоне 1, очевидно, связаны со значительно большими морфологическими характеристиками русла и водосбора р. Лонгтау: площадью водосборного бассейна, длиной, шириной русла реки, площадью дна реки, вовлеченного в процесс взмучивания илистых ДО и выноса взвешенного вещества с водами реки. Также на количество взвеси в р. Лонгтау влияет и более интенсивное ее антропогенное использование в хозяйстве (водный транспорт, траловые ловы гидробионтов, многочисленные аквакультуры), а также большой перепад уровня воды во время приливов и отливов. Определение скорости течения воды на поверхности и у дна рек, оценка расхода воды

– задачи, которые предстоит решать в дальнейших исследованиях.

Микроэлементы в воде

Полученные результаты изучения динамики концентраций растворенных микроэлементов в воде рек представлены в табл. 3, 4. В табл. 3, 4 не представлены данные по Be , потому что во всех пробах уровни Be были ниже предела детектирования (т. е. <0.0001 мкг/л). В нескольких пробах в акваториях рек Кагау и Лонгтау концентрации ниже предела детектирования были отмечены для Zn , As и Se : <0.100 , 0.001 и 0.010 мкг/л соответственно. В реках Кагау и Лонгтау концентрации в воде изученных ТМ и МЛ, как правило, – величины одного порядка (табл. 3, 4), но в большинстве случаев несколько более высокие концентрации наблюдали в р. Лонгтау. Только для Ag и Cu отмечены более высокие концентрации в воде р. Кагау, чем в р. Лонгтау. Это может свидетельствовать о ведущей роли морских вод в формировании химического состава воды в реках в отношении большинства элементов и о необходимости исследования концентрации элементов выше по течению в р. Лонгтау для уточнения источников поступления химических элементов в воду этой реки. В пользу значимой роли гидродинамического фактора в формировании химизма вод свидетельствуют более высокие концентрации многих элементов (V , Fe , Mo , Cu , Ag , Pb , Zn и др.) в центральной части р. Кагау (табл. 3). Во время отливов прибрежная полоса дна оголяется, а во время прилива она заливается потоком воды и ДО взмучиваются, часть их выносятся в виде взвешенного вещества в р. Лонгтау. Так как ДО р. Кагау содержат элементы (за исключением Zn , As , Pb) в более высоких концентрациях, чем ДО р. Лонгтау в районе исследований, то ДО могут быть источником вторичного загрязнения вод по ТМ и МЛ. В р. Лонгтау наличие на прибрежных станциях (2.3) элементов Fe , Co , Ni , Cu , Pb , Zn , Se , Tl (табл. 3, 4) в более высоких концентрациях может указывать на поступление их в залив Южно-Китайского моря с водами других рек, впадающих в море в этом районе, после чего с водами приливов они поступают в р. Лонгтау. В целом, проведенное исследование дало возможность определить, каким элементам следует уделять первостепенное внимание при дальнейших мониторинговых исследованиях, но большинство вопросов о причинно-следственных связях в формировании химического состава вод требует дальнейших исследований.

Сравнение полученных концентраций микроэлементов с нормативными концентрациями при загрязнении вод позволило определить приоритетные элементы для хеомоэкологического мониторинга (табл. 5).

Таблица 3. Концентрация растворенных микроэлементов в реках Кагау и Лонгтау (Д – придонный слой, П – поверхность, номера станций согласно рис. 1, п. д. – предел детектирования)

Маркировка пробы	Химический элемент						
	V, мкг/л	Fe, мкг/л	Co, мкг/л	Ni, мкг/л	Cu, мкг/л	Zn, мкг/л	As, мкг/л
	п. д. = 0.01	п. д. = 0.1	п. д. = 0.001	п. д. = 0.01	п. д. = 0.01	п. д. = 0.1	п. д. = 0.001
1.2 Д/L	0.78 ± 0.015	6.4 ± 0.16	0.005 ± 0.0002	0.79 ± 0.013	0.48 ± 0.005	5.01 ± 0.145	<0.001
1.1 П/L	0.22 ± 0.007	8.4 ± 0.15	0.063 ± 0.0009	0.28 ± 0.007	0.16 ± 0.005	0.73 ± 0.070	0.001 ± 0.002
1.2 П/L	0.83 ± 0.018	15.4 ± 0.29	0.015 ± 0.0006	0.79 ± 0.013	0.86 ± 0.019	2.46 ± 0.097	<0.001
1.3 П/L	0.24 ± 0.007	1.1 ± 0.06	0.021 ± 0.0008	0.20 ± 0.004	0.16 ± 0.004	<0.1	<0.001
Среднее для П/L	0.43 ± 0.270	8.3 ± 4.8	0.033 ± 0.020	0.42 ± 0.245	0.39 ± 0.147	1.06 ± 0.90	0.001 ± 0.003
1.2 Д/R	0.42 ± 0.009	17.3 ± 0.39	0.017 ± 0.0004	0.69 ± 0.010	0.77 ± 0.019	0.17 ± 0.066	0.030 ± 0.003
1.1 П/R	0.55 ± 0.017	4.4 ± 0.10	0.020 ± 0.0005	0.71 ± 0.014	0.42 ± 0.009	<0.1	<0.001
1.2 П/R	0.66 ± 0.014	19.2 ± 0.48	0.021 ± 0.0009	0.72 ± 0.013	2.86 ± 0.055	1.14 ± 0.067	0.013 ± 0.001
1.3 П/R	0.31 ± 0.011	3.1 ± 0.09	0.095 ± 0.0005	0.63 ± 0.017	0.36 ± 0.007	<0.1	<0.001
Среднее для П/R	0.51 ± 0.13	8.9 ± 6.8	0.046 ± 0.0330	0.69 ± 0.037	1.10 ± 1.100	0.38 ± 0.548	0.014 ± 0.014
2.2 Д/L	0.62 ± 0.012	5.0 ± 0.10	0.004 ± 0.0002	0.30 ± 0.006	0.75 ± 0.018	2.40 ± 0.100	0.018 ± 0.001
2.1 П/L	0.53 ± 0.013	4.1 ± 0.22	0.004 ± 0.0002	0.40 ± 0.008	0.22 ± 0.004	<0.1	<0.001
2.2 П/L	0.74 ± 0.013	6.5 ± 0.12	0.005 ± 0.0004	0.59 ± 0.009	0.48 ± 0.012	<0.1	0.054 ± 0.005
2.3 П/L	0.79 ± 0.015	38.1 ± 0.70	0.098 ± 0.0018	0.65 ± 0.012	0.66 ± 0.011	4.75 ± 0.211	0.013 ± 0.003
Среднее для П/L	0.69 ± 0.103	16.2 ± 4.57	0.036 ± 0.0416	0.55 ± 0.097	0.45 ± 0.157	1.84 ± 1.838	0.022 ± 0.017
2.2 Д/R	0.50 ± 0.010	12.5 ± 0.13	0.003 ± 0.0003	1.21 ± 0.026	0.73 ± 0.012	1.02 ± 0.074	0.030 ± 0.003
2.1 П/R	0.84 ± 0.014	10.3 ± 0.18	0.004 ± 0.0002	0.88 ± 0.015	0.49 ± 0.012	<0.1	0.117 ± 0.002
2.2 П/R	0.71 ± 0.019	13.0 ± 0.29	0.007 ± 0.0004	0.83 ± 0.018	0.77 ± 0.018	0.49 ± 0.074	<0.001
2.3 П/R	0.71 ± 0.019	6.2 ± 0.17	0.003 ± 0.0002	0.68 ± 0.015	0.55 ± 0.008	0.12 ± 0.035	<0.001
Среднее для П/R	0.75 ± 0.057	9.8 ± 2.43	0.005 ± 0.0002	0.80 ± 0.077	0.60 ± 0.011	0.43 ± 0.320	0.037 ± 0.022

В целом концентрации микроэлементов в воде были одного порядка и не превышали ПДК для рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{рх}) [20], за исключением Mo, что, вероятно, связано с более высокой величиной кларка Mo для морских вод [19] (табл. 5). При этом для Cu, Zn, Pb и Ag полученные максимальные концентрации в воде превышали ПБК_{хв} [16]. В акватории р. Кагау концентрация Cu превысила ПБК_{хв} в трех пробах, Zn – в одной пробе, Ag – в пяти пробах; в акватории р. Лонгтау – в пяти, одной и трех пробах соответственно (табл. 5). Это свидетельствует о том, что при хроническом влиянии на гидробионтов измеренных концентраций отмечено превышение порога концентраций микроэлементов, ниже которого воздействие микроэлементов на гидробионты можно было бы считать незначительным [35]. Устойчивое наличие таких концентраций, а тем более их увеличение могут негативно влиять на экологическое состояние акватории – на каче-

ство вод и жизнедеятельность гидробионтов. Отмечен единичный случай превышения ПДК для кратковременного воздействия поллютантов (ПДК_{кв}) [35] почти в 2 раза по Cu в акватории р. Кагау на ст. 1.2 в период отлива. В р. Лонгтау ПБК_{хв} была превышена для Pb, Cu, Zn и Mo. Превышение ПБК_{хв} на >30% в р. Кагау определено для V и Cd, в р. Лонгтау – для V. Концентрации входящих в РВ_{пв} семи элементов не превышали нормативные значения, установленные для источников категории А1. Следует отметить, что установленные РВ_{пв} нормативные концентрации Pb, Cu, Zn, Ni, Fe, как правило, в 2–20 раз превышают нормативные, установленные в других странах [20, 35].

Соленость, наблюдаемая в акваториях рек, была достаточно высокой, ПЕС: в р. Кагау – от 22.44 до 23.54, а в р. Лонгтау – от 19.95 до 26.73 (табл. 2). Также уровень воды менялся от отлива к приливу на несколько метров, что говорит об обильном за-

Таблица 4. Концентрация растворенных микроэлементов в реках Кагау и Лонглау

Маркировка пробы	Химический элемент													
	Se, мкг/л	Mo, мкг/л	Ag, мкг/л	Cd, мкг/л	Sb, мкг/л	Tl, мкг/л	Pb, мкг/л	Se, мкг/л	Mo, мкг/л	Ag, мкг/л	Cd, мкг/л	Sb, мкг/л	Tl, мкг/л	Pb, мкг/л
1.2 ДЛ	<0.01	3.01 ± 0.054	0.0517 ± 0.0011	0.034 ± 0.0008	0.0161 ± 0.0006	0.0019 ± 0.0003	0.973 ± 0.038	п.д. = 0.01	п.д. = 0.01	п.д. = 0.0001	п.д. = 0.0001	п.д. = 0.0001	п.д. = 0.0001	п.д. = 0.01
1.1 ПЛ	<0.01	1.34 ± 0.037	0.0117 ± 0.0008	0.007 ± 0.0005	0.0049 ± 0.0003	<0.0001	0.118 ± 0.007							
1.2 П/Л	0.02 ± 0.013	2.44 ± 0.037	0.1077 ± 0.0027	0.015 ± 0.0012	0.0099 ± 0.0003	0.0014 ± 0.0002	0.456 ± 0.015							
1.3 П/Л	<0.01	1.27 ± 0.033	0.0051 ± 0.0009	0.002 ± 0.0001	0.0070 ± 0.0003	<0.0001	0.054 ± 0.003							
Среднее для П/Л	0.01 ± 0.002	1.68 ± 0.503	0.0415 ± 0.0337	0.008 ± 0.0047	0.0073 ± 0.0018	0.0009 ± 0.0008	0.209 ± 0.164							
1.2 Д/Р	<0.01	1.25 ± 0.030	0.0670 ± 0.0023	0.013 ± 0.0005	0.0134 ± 0.0005	0.0015 ± 0.0003	0.174 ± 0.007							
1.1 П/Р	0.02 ± 0.011	1.39 ± 0.061	0.0080 ± 0.0012	0.007 ± 0.0003	0.0174 ± 0.0005	0.0005 ± 0.0002	0.035 ± 0.003							
1.2 П/Р	<0.01	2.04 ± 0.035	0.0604 ± 0.0010	0.007 ± 0.0004	0.0080 ± 0.0003	0.0005 ± 0.0003	0.138 ± 0.005							
1.3 П/Р	<0.01	1.22 ± 0.028	0.0035 ± 0.0003	0.007 ± 0.0004	0.0066 ± 0.0003	0.0011 ± 0.0001	0.052 ± 0.005							
Среднее для П/Р	0.01 ± 0.002	1.55 ± 0.327	0.239 ± 0.2427	0.007 ± 0.0004	0.0114 ± 0.06	0.0007 ± 0.0003	0.075 ± 0.042							
2.2 Д/Л	<0.01	1.53 ± 0.022	0.0388 ± 0.0012	0.010 ± 0.0006	0.0155 ± 0.0004	0.0016 ± 0.0002	0.210 ± 0.007							
2.1 П/Л	<0.01	2.01 ± 0.035	0.0403 ± 0.0013	0.005 ± 0.0006	0.0139 ± 0.0005	0.0011 ± 0.0002	0.053 ± 0.005							
2.2 П/Л	<0.01	1.52 ± 0.027	0.0782 ± 0.0017	0.008 ± 0.0005	0.0200 ± 0.0009	0.0019 ± 0.0002	0.217 ± 0.007							
2.3 П/Л	0.13 ± 0.026	1.37 ± 0.041	0.0356 ± 0.0014	0.009 ± 0.0006	0.0185 ± 0.0006	0.0021 ± 0.0001	0.283 ± 0.009							
Среднее для П/Л	0.04 ± 0.045	1.63 ± 0.250	0.0514 ± 0.0176	0.007 ± 0.0017	0.0175 ± 0.0024	0.0017 ± 0.0004	0.184 ± 0.009							
2.2 Д/Р	<0.01	0.66 ± 0.017	0.0065 ± 0.0005	0.018 ± 0.0005	0.0110 ± 0.0005	0.0016 ± 0.0003	0.326 ± 0.014							
2.1 П/Р	<0.01	1.41 ± 0.030	<0.0001	0.009 ± 0.0003	0.0117 ± 0.0003	0.0012 ± 0.0002	0.073 ± 0.005							
2.2 П/Р	0.07 ± 0.013	0.20 ± 0.006	0.0103 ± 0.0004	0.015 ± 0.0006	0.0086 ± 0.0003	0.0028 ± 0.0004	0.242 ± 0.009							
2.3 П/Р	0.20 ± 0.020	0.77 ± 0.019	<0.0001	0.010 ± 0.0006	0.0179 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0002	0.142 ± 0.006							
Среднее для П/Р	0.07 ± 0.62	0.79 ± 0.041	0.0053 ± 0.0045	0.011 ± 0.0023	0.0127 ± 0.0023	0.0021 ± 0.0063	0.152 ± 0.060							

Таблица 5. Диапазон концентраций растворенных в воде микроэлементов (C_B) в реках Кагау и Лонгтау, отдельные нормативные показатели и экологогеохимические характеристики состояния вод в отношении изучаемых микроэлементов (жирным шрифтом выделены данные, превышающие одно из нормативных значений и этот норматив; н. д. – нет данных)

Химический элемент	Диапазон C_B , мкг/л, в р. Кагау в р. Лонгтау	ПДК _{рх} , мкг/л [20]	ПДК _{кв} , мкг/л [35]	ПБК _{хв} , мкг/л [35]	РВ _{пв} для источников категории А1, мкг/л [32]	Кларк элемента в морской воде, мкг/кг [19]
Pb	<u>0.035–0.456</u> <u>0.053–0.326</u>	10	11	0.3	20	0.03
Cu	<u>0.155–2.861</u> <u>0.077–0.765</u>	5	1.5	0.5	100	0.25
Zn	<u><0.100–5.011</u> <u><0.100–4.52</u>	50	9.4	2.9	500	1.0
Ni	<u>0.204–0.792</u> <u>0.299–1.211</u>	10	5.1	3.3	100	0.5
Co	<u>0.005–0.063</u> <u>0.003–0.097</u>	10	2.8	0.2	н. д.	0.03
V	<u>0.22–0.83</u> <u>0.50–0.84</u>	1	4.3	0.9	н. д.	2.0
As	<u><0.001–0.013</u> <u><0.001–0.117</u>	10	25	1.0	10	2.0
Ag	<u>0.004–0.108</u> <u><0.0001–0.072</u>	н. д.	1.2	0.01	н. д.	0.1
Mo	<u>1.224–3.011</u> <u>0.661–2.008</u>	1	290	4.3	н. д.	10
Cd	<u>0.002–0.034</u> <u>0.005–0.018</u>	10	0.4	0.08	5	0.07
Se	<u><0.01–0.019</u> <u><0.001–0.199</u>	2	5.3	0.09	н. д.	0.1
Sb	<u>0.005–0.017</u> <u>0.009–0.019</u>	н. д.	6.5	0.4	н. д.	0.003
Fe	<u>1.13–19.22</u> <u>1.32–38.10</u>	100	н. д.	н. д.	500	5.0
Be	<u><0.0001</u> <u><0.0001</u>	0.3	0.2	0.02	н. д.	0.005
Tl	<u><0.0001–0.0019</u> <u>0.0011–0.0028</u>	н. д.	1.6	0.06	н. д.	0.01

ходе морских вод на исследованные участки рек. В центре русла р. Кагау глубина менялась от 9 до 4.5 м, а р. Лонгтау – от 34.4 до 28.2 м. Это позволяет провести сравнение концентраций микроэлементов в воде с кларком для морских вод. В этом

случае наблюдается превышение максимальных концентраций семи микроэлементов (Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Sb, Fe) в обеих реках и Se в р. Лонгтау в соленой воде над кларком. Измеренные величины превышали кларки в разы – от нескольких до

Таблица 6. Средние концентрации, мкг/л, микроэлементов в слоях П и Д в воде рек на полигонах 1 и 2 и ПДК_{рх} [20] (жирным шрифтом выделены данные, превышающие одно из нормативных значений и этот норматив; н. д. – нет данных)

№ полигона. Река	Вид пробы	Элемент						
		Pb	Cu	Zn	Ni	Co	V	As
1. р. Кагау	ПДК _{рх} , мкг/л	10	5	50	10	10	1	10
	П вода	0.142	0.802	0.172	0.577	0.025	0.467	0.004
	Д вода	0.574	0.627	2.506	0.743	0.011	0.597	0.016
	П вода	0.168	0.413	0.945	0.670	0.020	0.719	0.031
2. р. Лонгтау	Д вода	0.268	0.737	1.712	0.755	0.004	0.563	0.024
	П вода	0.027	1.212	0.009	0.073	0.015	13.011	0.002
1. р. Кагау	Вид пробы	Ag	Mo	Cd	Se	Sb	Fe	Tl
	ПДК _{рх} , мкг/л	н. д.	1	10	2	н. д.	100	н. д.
	П вода	0.033	1.618	0.007	0.123	0.009	8.618	0.001
	Д вода	0.059	2.130	0.023	<0.01	0.015	11.826	0.002
2. р. Лонгтау	П вода	0.027	1.212	0.009	0.073	0.015	13.011	0.002
	Д вода	0.021	1.093	0.014	<0.01	0.013	8.774	0.002

пятнадцати, что свидетельствовало об особенностях формирования геохимического фона в водах рек Канзё, к тому же кларки химических элементов в разных акваториях Мирового океана существенно различаются. В Канзё речные экосистемы превратились в соленые водные и кроме антропогенного влияния (многочисленных аквахозяйств по выращиванию гидробионтов, в частности – моллюсков, большого промышленного центра – г. Хошимина) постоянно испытывают влияние морских вод. Поверхностный сток вод и атмосферный перенос веществ могут сказываться на формировании геохимического фона водной среды речных экосистем, и поэтому необходимо проведение хеомоэкологического мониторинга водных экосистем в Канзё во влажный сезон в период половодья рек – время обильных дождей, а также в сухой и промежуточные сезоны.

Сравнение средних концентраций микроэлементов в поверхностной и придонной воде рек (табл. 6) с нормативными свидетельствует о том, что превышение ПДК_{рх} наблюдалось только для Mo на обоих полигонах. Следует отметить, что из всех измеренных элементов необходимо обратить внимание также и на V. Его средние концентрации в воде составляли до 72% (в среднем 53%) от ПДК_{рх}, и его можно отнести к потенциально критическим элементам, изменение концентраций которого требуют дальнейших мониторинговых наблюдений. Поэтому в современный период в целом необходимо уделять внимание мониторингу Pb, Cu, Zn, Mo, Ag, V, Cd как элементам, концентрации которых превысили нормативные или приближаются к ним, превышение будет вызы-

вать нарушение жизнедеятельности гидробионтов и ухудшать качество биологических ресурсов.

Сравнение концентраций микроэлементов в поверхностных и придонных водах показало, что для разных групп элементов уровни концентраций в этих слоях вод различны. Определены более высокие средние концентрации Cd, Pb, Zn, Ni в придонном слое на обоих полигонах, что может указывать на роль в этом ДО, которые подвержены регулярному взмучиванию, или взвешенного вещества. Для Co и Se более высокие концентрации были измерены в поверхностной воде. Для остальных элементов тенденции изменения концентраций были разнонаправленными на разных станциях. По сравнению с р. Кагау в р. Лонгтау в поверхностной воде наблюдали более высокие концентрации таких микроэлементов, как Pb, Zn, Ni, V, As, Sb, Fe, Tl. Эти данные могут характеризовать морские воды как возможный источник поступления данных микроэлементов в реки Канзё. В целом, водная среда обеих рек в Канзё характеризуется достаточно низкими концентрациями изученных микроэлементов, за некоторым исключением. Очевидно, это связано с ограничением антропогенной деятельности в буферной зоне биосферного заповедника и с незначительным поступлением микроэлементов в речные акватории, а также с постоянным выносом микроэлементов в морской залив. Концентрации микроэлементов с учетом поверхностных и придонных вод более высокие в р. Кагау (внутреннем водотоке Канзё) по сравнению с концентрациями в р. Лонгтау на исследованном полигоне в ее прилегающей к морю акватории (табл. 3, 4). Это сви-

детельствует о более значимой роли внутреннего региона Канзё в поставке микроэлементов в воды р. Кагау по сравнению с морскими водами. Нельзя исключать и возможность влияния всего водосборного бассейна рек.

Микроэлементы в донных отложениях

Результаты определения концентрации ТМ и МЛ в поверхностном (0–5 см) слое ДО представлены в табл. 7. Полученные данные показали, что более высокие концентрации отмечены в илистых ДО р. Канзе для большинства элементов, за исключением Pb и As, концентрации которых были примерно равными на станциях обоих полигонов (табл. 7). Концентрации Cd были ниже предела детектирования на всех исследованных станциях. Анализ полученных концентраций ТМ и МЛ в ДО рек в Канзё (табл. 7) показал, что концентрации микроэлементов в ДО варьировали намного меньше, чем концентрации микроэлементов в воде (табл. 3, 4). Это подтверждает статус ДО как компонента водной экосистемы более инертного, чем вода, и дающего интегрированную и более стабильную характеристику хемозоологического состояния акватории. Для Co и Mo в ДО на обоих полигонах определено превышение ПБК_{хв}. При этом в акватории р. Кагау на всех станциях отмечено превышение норматива для Co, а в акватории р. Лонгтау только максимальные концентрации Co были выше ПБК_{хв} (ст. 2.3L и 2.1R). Концентрации Mo превысили ПБК_{хв} в обеих акваториях только на единичных станциях (ст.1.1L и 2.3L), а в отношении Ni и Se превышение наблюдали только в р. Кагау. Концентрации остальных элементов не превышали установленных нормативов, но к потенциально критическим элементам, концентрация которых >30% ПБК_{хв}, следует отнести V, Cu, Zn, As, Be. При этом концентрации высоко опасного элемента Cd были ниже предела детектирования в ДО на обоих полигонах. По ПДК_{кв} к потенциально критическим элементам можно отнести Ni (86), Co (78), V (70), Be (56), Tl (55), Se (48% от ПДК_{кв}) (табл. 8). Полученные результаты указывают на критические и потенциально-критические элементы, в отношении которых в первую очередь необходимы мониторинговые наблюдения. Мониторинговые данные будут использованы для оперативной оценки хемозоологического состояния ДО в реках Кагау и Лонгтау и для выявления тенденций изменения геохимического фона в водоемах в этом районе, а также для выявления источников поступления избыточного количества ТМ и МЛ.

Результаты исследований указывают на значительно более высокие концентрации микроэлементов в ДО (как это показано и для почв [2]), чем

их концентрации в воде. Поэтому большие величины взвешенного вещества в поверхностной и придонной воде, как отмечено выше, несомненно, играют важную роль в перераспределении микроэлементов и в их миграции. Известно, что все микроэлементы обладают достаточно высокой сорбционной активностью и сорбируются на частицах взвешенного вещества. Чем больше взвеси в воде, тем в большем количестве микроэлементы поступают со взвесью в донные отложения (в первую очередь с крупнодисперсной взвесью), и микроэлементы перераспределяются из воды в ДО. А с мелкодисперсной взвесью элементы мигрируют на большие расстояния, что усиливает вынос микроэлементов за пределы акватории. Мангровые заросли, очевидно, – один из главных поставщиков взвешенного вещества в реки региона наряду с поверхностным стоком и абразией берегов. Процессы взаимодействия химических веществ со взвесью и ее перенос, наряду с гидрологическим выносом растворенных форм микроэлементов с водными массами, могут играть важную роль в самоочищении экосистем внутренних рек Канзё от поступающих в них ТМ и МЛ, которые характеризуются большей или меньшей токсичностью для живых организмов (табл. 5, 8). Количественная оценка роли ДО и взвеси в перераспределении техногенных веществ в этих акваториях – задача дальнейших исследований.

Сравнение полученных результатов с результатами ранее проведенных исследований речных акваторий в южной части Вьетнама показало, что в реках Канзё уровни ТМ и МЛ значительно ниже, чем в реках промышленных районов, как, например, в р. Шерепок в провинции Даклак, где превышения нормативных значений более значительные [12]. В отдельных протоках дельты р. Меконг, как и в Канзё, наблюдали превышение концентраций ТМ и МЛ только по международным нормам качества вод [24]. Необходимо отметить, что в р. Шерепок значимое превышение норм РВ_{пв} для ТМ наблюдали в сезон дождей, тогда как в сухой сезон измеренные величины концентраций ТМ не превышали норматив РВ_{пв}. Поэтому для более точной оценки экологического состояния акваторий рек Канзё необходимы хемозоологические исследования и в сезон дождей в период половодья рек, тогда как представленные выше исследования в реках Канзё выполнены в мае – в пограничный период между сухим сезоном и сезоном дождей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты хемозоологических исследований в акваториях рек Кагау и Лонгтау в Канзё позволили установить наличие определенных рисков в отношении экологического состоя-

Таблица 7. Концентрации микроэлементов в поверхностном (0–5 см) слое ДО (п.д. – предел детектирования)

Маркировка пробы	Химический элемент						
	V, мг/кг	Fe, г/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Be, мг/кг
	п.д. = 0.1	п.д. = 0.1	п.д. = 0.1	п.д. = 0.1	п.д. = 0.1	п.д. = 0.1	п.д. = 0.01
1.1L 0-5	38.78 ± 1.13	37.30 ± 0.96	12.86 ± 0.54	35.89 ± 1.32	18.32 ± 0.62	64.54 ± 2.63	0.67 ± 0.04
1.2L 0-5	38.40 ± 1.13	37.25 ± 1.05	12.45 ± 0.46	37.93 ± 1.47	17.70 ± 0.59	93.60 ± 4,47	0.56 ± 0.03
1.3L 0-5	37.26 ± 1.29	37.33 ± 0.99	12.53 ± 0.49	32.02 ± 1.07	17.98 ± 0.49	83.50 ± 3.20	0.49 ± 0.03
1.1R 0-5	36.62 ± 1.66	35.64 ± 1.02	12.11 ± 0.32	32.09 ± 1.06	16.58 ± 0.58	67.31 ± 5.00	0.51 ± 0.04
1.2R 0-5	30.19 ± 1.19	31.55 ± 0.99	10.69 ± 0.48	31.47 ± 1.27	15.00 ± 0.47	77.47 ± 4.50	0.30 ± 0.03
1.3R 0-5	35.88 ± 1.36	37.96 ± 1.47	12.53 ± 0.43	29.43 ± 0.93	15.48 ± 0.50	54.49 ± 4.51	0.38 ± 0.06
2.1L 0-5	18.07 ± 0.54	25.59 ± 0.95	7.19 ± 0.23	12.18 ± 0.50	6.77 ± 0.25	17.08 ± 1.85	<0.01
2.3L 0-5	37.30 ± 1.46	47.23 ± 1.73	14.87 ± 0.55	32.10 ± 1.26	15.85 ± 0.52	51.49 ± 3.77	0.41 ± 0.05
2.1R 0-5	23.07 ± 0.79	36.85 ± 1.37	9.39 ± 0.32	17.77 ± 0.41	9.57 ± 0.31	24.41 ± 2.73	<0.01
2.3R 0-5	22.32 ± 0.78	29.66 ± 0.91	8.37 ± 0.37	20.50 ± 1.00	10.85 ± 0.41	41.04 ± 3.75	0.17 ± 0.03
Маркировка пробы	Химический элемент						
	As, мг/кг	Se, мг/кг	Mo, мг/кг	Ag, мг/кг	Sb, мг/кг	Tl, мг/кг	Pb, мг/кг
	п.д. = 0.1	п.д. = 0.1	п.д. = 0.01	п.д. = 0.001	п.д. = 0.01	п.д. = 0.001	п.д. = 0.1
1.1L 0-5	9.84 ± 0.39	1.28 ± 0.27	9.05 ± 0.48	0.274 ± 0.031	0.866 ± 0.133	0.035 ± 0.002	15.3 ± 0.62
1.2L 0-5	10.30 ± 0.45	1.44 ± 0.20	2.75 ± 0.26	0.174 ± 0.023	0.248 ± 0.048	0.016 ± 0.006	14.3 ± 0.42
1.3L 0-5	9.38 ± 0.26	0.42 ± 0.11	1.46 ± 0.21	0.100 ± 0.003	0.117 ± 0.022	<0.001	14.3 ± 0.55
1.1R 0-5	8.10 ± 0.35	<0.1	0.24 ± 0.02	<0.001	0.072 ± 0.011	<0.001	14.2 ± 0.65
1.2R 0-5	8.13 ± 0.15	0.65 ± 0.14	0.05 ± 0.04	<0.001	0.044 ± 0.007	<0.001	13.0 ± 0.56
1.3R 0-5	10.10 ± 0.37	<0.1	0.47 ± 0.06	<0.001	0.042 ± 0.007	<0.001	14.4 ± 0.51
2.1L 0-5	8.35 ± 0.31	<0.1	0.56 ± 0.10	<0.001	0.060 ± 0.006	<0.001	7.8 ± 0.28
2.3L 0-5	12.22 ± 0.34	<0.1	4.60 ± 0.17	<0.001	0.027 ± 0.004	<0.001	13.5 ± 0.61
2.1R 0-5	12.90 ± 0.40	<0.1	1.13 ± 0.05	<0.001	0.048 ± 0.008	<0.001	12.5 ± 0.58
2.3R 0-5	7.93 ± 0.29	<0.1	0.87 ± 0.02	0.011 ± 0.004	0.083 ± 0.006	<0.001	13.3 ± 0.41

ния вод и ДО по концентрациям ТМ и МЛ, взвешенного вещества и РО. Они позволили отметить критические и потенциально критические элементы в воде и в ДО, охарактеризовать отдельные особенности хемозкологического состояния изучаемых районов и рассматривать реки Канзё как своего рода модельные объекты для изучения дельты Меконга и других аналогичных водотоков.

Установлено, что по $PВ_{пв}$ в водах исследованных акваторий превышены нормативы для источников категории А1 по концентрации взвешенного вещества в воде, а концентрация РО в воде была ниже норматива.

Концентрации ТМ не превышены по $PВ_{пв}$, но по отдельным элементам превышены нормативные показатели, применяемые в других странах, в частности в России и Нидерландах.

В воде р. Кагау к критическим элементам отнесены Pb, Cu, Zn, Mo, Ag, к потенциально критическим – V, Cd; в р. Лонгтау к критическим –

Pb, Cu, Zn, Mo, Se, к потенциально критическим – V.

Для ДО в р. Кагау критическими элементами определены Co, Mo, Ni, Se, для р. Лонгтау – только Co и Mo. Потенциально критические элементы для обеих рек – V, Cu, As, Zn, Be.

Наличие критических и потенциально критических элементов среди исследованного перечня ТМ и МЛ свидетельствует о необходимости проводить мониторинговые наблюдения за хемозкологическим состоянием вод и ДО в реках Канзё для выявления тенденций изменения геохимического фона в водоемах в этом районе в отношении критических и потенциально критических элементов и выявления источников их поступления, ведущих процессов миграции и перераспределения элементов в акваториях. Результаты наблюдений будут важны для формирования научных основ рациональной системы мониторинга техногенных веществ и оценки экологического состояния и прогноза тенденций изменения эко-

Таблица 8. Концентрации микроэлементов в ДО (слой 0–5 см) в реках Кагау и Лонгтау в Канзё и ПДК микроэлементов для ДО (жирным шрифтом выделены данные, превышающие одно из нормативных значений и этот норматив; н. д. – нет данных)

Химический элемент	Диапазон концентраций элементов в ДО рек, мг/кг		ПДК _{кв} , мг/кг [35]	ПБК _{кв} , мг/кг [35]	РВ _{до} – нормативные значения качества для ДО, мг/кг [33]
	р. Кагау	р. Лонгтау			
V	30.19–38.78	18.07–37.30	56	42	н. д.
Cu	15.00–18.32	6.77–15.85	73	36	108
Ni	29.43– 37.93	12.80–32.10	44	35	н. д.
Co	10.69–12.86	7.19– 14.87	19	9	н. д.
Mo	0.05– 9.05	0.56– 4.60	200	3	н. д.
Sb	0.042–0.866	0.027–0.083	15	3	н. д.
Fe	31550–37960	25.59–47.33	н. д.	н. д.	н. д.
Pb	13.04–15.30	7.75–13.47	530	85	112
As	8.10–10.30	7.93–12.90	55	29	41.6
Cd	<0.001	<0.001	12	0.8	4.2
Zn	54.49–93.60	17.08–51.49	620	140	271
Se	<0.1– 1.44	<0.1	2.9	0.7	н. д.
Ag	<0.001–0.27	<0.001–0.11	5.5	н. д.	н. д.
Be	0.49–0.67	<0.01–0.41	1.2	1.1	н. д.
Tl	<0.1–1.44	<0.1	2.6	1	н. д.

логического состояния речных акваторий, подверженных антропогенному влиянию и действию природных факторов – прежде всего глобальному изменению климата и засолонению речных вод, проявляющихся в странах юго-восточной Азии. Данные также важны для принятия решений по развитию региона, включающего в себя ценные природные охраняемые водные экосистемы и акватории, используемые человеком в разных социально-хозяйственных сферах, включая аквакультуру, а также имеющие общебиологическое значение для сохранения видового разнообразия уникальных водных природных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеева Н.Н.* Вьетнам. Природа: физико-географический очерк // Большая советская энциклопедия. [Электронный ресурс]. <http://bigenc.ru> (дата обращения: 21.05.2022)
2. *Водяницкий Ю.Н.* Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.
3. География Вьетнама. Географическое описание Вьетнама. [Электронный ресурс]. <http://www.world-globe.ru/countries/vietnam/geography/> (дата обращения: 21.05.2022)
4. Главное статистическое управление Вьетнама. [Электронный ресурс]. https://www.gso.gov.vn/default_en.aspx?tabid=467&idmid=3&ItemID=14454 (дата обращения: 21.05.2022)
5. ГОСТ Р 56219–2014. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. М.: Стандартинформ, 2015. 36 с.
6. Знаменитые реки Вьетнама. [Электронный ресурс]. <zen.yandex.ru> (дата обращения: 27.05.2022)
7. *Золотокопова С.В., Нго Т.К.* Влияние промышленного производства на экологическое состояние реки Шерепок (Вьетнам) // Вестн. науч. конф. Тамбов, 2017. № 4. Ч. 1. С. 60–61.
8. *Ле Бинь Зьонг.* Воздействие угледобывающих предприятий Вьетнама на гидросферу // Изв. Тульского ГУ. Науки о Земле. 2015. Вып. 1. С. 14–21.
9. *Ле Тхи Винь.* Тяжелые металлы в сфере залива Ван Фонг (про. Кханьхоа) // Журн. наук и морской технологии. 2012. № 3. С. 12–23.
10. Масс-спектрометры с индуктивно связанной плазмой (ИСП–МС): PlasmaQuant MS и PlasmaQuant MS Elite. Инструкция по эксплуатации. Йена: Analytik Jena AG, 2014. 143 с.
11. *Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Параскив А.А., Проскурнин В.Ю., Морозов Е.Г.* Тяжелые металлы в поверхностной воде Атлантического сектора Антарктики в 79-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Морской биол. журн. 2020. Т. 5. № 4. С. 56–68.
12. *Нго Тхе Кыонг.* Содержание и закономерности распределения тяжелых металлов и мышьяка в речных экосистемах промышленно развитых районов Вьетнама (на примере р. Шерепок, провинция Даклак). Дис. ... канд. биол. наук. М.: РУДН, 2018. 199 с.

13. *Нгуен Ван Зунг*. Экологические проблемы дельты реки Меконг // Сб. докл. VI Всерос. науч.-практ. конф. “Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов”. Томск, 2013. Т. I. С. 96–98.
14. ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. М.: Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, 2011. 45 с.
15. Река Лонгтау. [Электронный ресурс] https://www.hmong.press/wiki/Long_Tau_river (дата обращения: 05.06.2022)
16. Река Донгнай. [Электронный ресурс] <http://wiki5.ru> (дата обращения: 05.06.2022)
17. РД 52.10.243-92 Руководство по химическому анализу морских вод. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200042955> (дата обращения: 27.02.2022)
18. Руководство по методам химического анализа морских вод / Под ред. С.Г. Орадовского. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 118–131.
19. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под ред. А.П. Солова, А.Я. Архипова, В.А. Бугрова. М.: Недра, 1990. 335 с.
20. Справочник. Характеристики загрязняющих веществ. Раздел II. Для водных объектов. Пермь: Экология, 2016. 296 с.
21. *Хоанг Тхи Тхань Тхуй*. Тяжелые металлы в отложениях в реке Сайгон, г. Хошимин // Журн. науч. разработок и технологий. 2007. № 1. С. 27–37.
22. *Фам Виет Ну*. Загрязнение As в дельте Меконг // Сельское хоз-во и развитие сельских местностей. 2011. № 2. С. 15–21.
23. Физико-географическое положение Вьетнама. [Электронный ресурс]. <https://fb.ru/article/380112/vietnam-geograficheskoe-polojenie-i-obschie-svedeniya-o-strane> (дата обращения: 22.06.2022)
24. *Фунг Тхай Зьонг*. Эколого-геохимическое состояние дельты реки Меконг (республика Вьетнам) по результатам изучения донных отложений. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск: НИТПУ, 2015. 26 с.
25. Biosphere reserves. [Электронный ресурс]. <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/asia-and-the-pacific/vietnam/can-gio-mangrove/> (дата обращения: 22.10.2021)
26. *Cao Vu Hung, Bui Duy Cam, Pham, Thi Ngoc Mai, Bach Quang Dzung*. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in municipal sewage sludge from a river in highly urbanized metropolitan area in Hanoi, Vietnam: levels, accumulation pattern and assessment of land application // Environ. Geochem. Health. 2015. № 37. P. 133–146.
27. *Cenci R.M., Martin J.M.* Concentration and fate of trace metals in Mekong River Delta // Sci. Total Environ. 2004. № 332. P. 167–182.
28. *Chernykh N.A., Tran Quoc Hoan, Baeva Yu.I., Grachev V.A.* The Regularities of Heavy Metals and Arsenic Accumulation in the Vegetation of Riverside Depending on the Level of Technogenic Load // J. Pharm. Sci. Res. 2018. V. 10. № 4. P. 800–804.
29. *Hurt B.T., Jones M.J., Pistone G.* Transboundary Water Quality Issues in the Mekong River Basin // Mekong River Commission. Melbourne: Water Studies Centre, Monash Univ., 2001. 77 p.
30. *Nguyen Thanh Giao, Huynh Thi Hong Nhien*. Assessment of surface water quality and monitoring in southern Vietnam using multicriteria statistical approaches // Sustainable Environ. Res. 2022. V. 32. № 2. P. 2–12.
31. *Nguyen T.L.H., Ohtsubo M., Li L.Y., Higashi T.* Heavy metal pollution of the To-Lich and Kim-Nguu River in Hanoi City and the industrial source of the pollutants // J. Fac. Agr. Kyushu Univ. 2007. V. 2. № 1. P. 141–146.
32. 14QCVN 08-MT:2015/BTNMT. QUY CHUẨN KỸ THUẬT QUỐC GIA VỀ CHẤT LƯỢNG NƯỚC MẶT. National Technical Regulation on Surface Water Quality. HÀ NỘI – 2015. 13 tr. [Электронный ресурс] <http://cem.gov.vn/storage/documents/5d6f3ecb26484qcvn-08-mt2015btnmt.pdf>. (дата обращения: 29.11.2021) (Вьетнамский язык)
33. 15QCVN 43:2017/BTNMT. QUY CHUẨN KỸ THUẬT QUỐC GIA VỀ CHẤT LƯỢNG TRẦM TÍCH. National Technical Regulation on Sediment Quality. [Электронный ресурс] <https://luatvietnam.vn/tai-nguyen/quy-chuan-qcvn-43-2017-btnmt-chat-luong-tram-tich-166191-d3.html> (дата обращения: 29.11.2021) (Вьетнамский язык)
34. *Prathumratana L., Sthiannopkao S., Kim K.W.* The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River // Environ. Int. 2008. № 34. P. 860–866.
35. *Warmer Henk, Ronald van Dokkum*. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice the Netherlands. Lelystad: RIZA, 2002. 76 p.