

Углеводородный состав воды и взвеси реки Хамлуонг (Юго-Восточная Азия)

О. В. Соловьёва¹, Е. А. Тихонова^{1*},
Ю. С. Ткаченко¹, Нгуен Чонг Хиеп²

¹ ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического
научно-исследовательского и технологического центра, Хошимин, Вьетнам

* e-mail: tihonova@mail.ru

А н н о т а ц и я

Проведена оценка качественного и количественного состава углеводородов воды и взвешенного вещества с учетом их трансформации при миграции в системе вода – взвесь дельты реки на примере одного из самых полноводных рукавов Меконга (р. Хамлуонг) на территории Вьетнама в условиях тропического климата. Материалом для исследования послужили пробы поверхностной и придонной воды, отобранные вдоль русла реки в ноябре – декабре 2022 г. Физико-химические параметры среды измеряли *in situ* с помощью мультиметра. Качественный и количественный состав углеводородов в воде и взвеси определяли методом газовой хроматографии. Для идентификации вероятных источников поступления органических веществ использовали биогеохимические маркеры происхождения углеводородов. Значения отдельных физико-химических показателей водной среды (рН, O₂, соленость, температура, концентрация взвешенного вещества) являются характерными для исследуемой р. Хамлуонг. Эти значения находились в пределах, характеризующих благополучное состояние водоема во влажный сезон. Содержание углеводородов в воде р. Хамлуонг в среднем составляло 0.061 ± 0.019 мг·л⁻¹. Данное значение является достаточно высоким и превышает санитарные нормы (0.05 мг·л⁻¹) для рыбохозяйственных водоемов или приближаются к ним. Концентрация углеводородов во взвешенном веществе составляла в среднем 0.019 ± 0.009 мг·л⁻¹. В районе впадения реки в море содержание углеводородов во взвешенной фазе было выше, чем на участках реки, находящихся выше по течению. Углеводороды в воде были смешанного происхождения. Во взвешенном веществе наряду с биогенными соединениями отмечаются также биодegradированные соединения нефтяной природы. В результате биотрансформации состав n-алканов в пробах взвешенного вещества и в пробах воды существенно различается.

Ключевые слова: углеводороды, n-алканы, вода, взвесь, биогеохимические маркеры, тропическая река, река Меконг, река Хамлуонг, Вьетнам

© Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Ткаченко Ю. С., Нгуен Чонг Хиеп, 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках НИР Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (СРВТ-НИИТЦ) «Эколан Э-3.4. Экосистема реки Меконг в условиях глобальных климатических изменений и антропогенного воздействия», темы госзадания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБЮМ) «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ гос. регистрации: 121031500515-8).

Для цитирования: Углеводородный состав воды и взвеси реки Хамлуонг (Юго-Восточная Азия) / О. В. Соловьёва [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 129–142. EDN DHTIBX.

Hydrocarbon Composition of Water and Suspended Matter of the Ham Luong River (Southeast Asia)

O. V. Soloveva¹, E. A. Tikhonova^{1*},
Yu. S. Tkachenko¹, Nguyen Trong Hiep²

¹*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

²*Southern Branch of Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, Ho Chi Minh, Vietnam*

* e-mail: tihonova@mail.ru

Abstract

The qualitative and quantitative composition of water and suspended matter hydrocarbons was assessed. The transformation of these compounds during their migration in the water-suspension system of the river delta in a tropical climate was studied on the example of one of the deepest branches of the Mekong River (Ham Luong River) in Vietnam. The material for the study was samples of surface and bottom water taken along the riverbed in November–December 2022. The physicochemical parameters of the environment were measured using a multimeter *in situ*. The qualitative and quantitative composition of hydrocarbons in the water and suspended matter was determined by gas chromatography. Biogeochemical markers of the origin of hydrocarbons were used to identify probable sources of organic matter. Individual physicochemical indicators of the aquatic environment (pH, O₂, salinity, temperature, concentration of suspended matter) were characteristic for the rivers of the lower Mekong River and were within the limits characterizing the favorable state of the reservoir during the wet season. The content of hydrocarbons in the water of the Ham Luong River averaged $0.061 \pm 0.019 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. These indicators were quite high, exceeding the sanitary standards ($0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) for fishery reservoirs or approaching this value. The concentration of hydrocarbons in suspended matter averaged $0.019 \pm 0.009 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. An increase in the content of hydrocarbons in the suspended phase was noted in the area where the river flows into the sea, in comparison with the sections of the river located upstream. Hydrocarbons in the water were of mixed origin and contained both biogenic components of autochthonous and allochthonous origin as well as traces of oil pollution. In the suspended matter, along with biogenic compounds, there are also biodegraded petroleum compounds. As a result, the composition of n-alkanes in the suspended matter differed significantly from that in the water samples.

Keywords: hydrocarbons, n-alkanes, water, suspended matter, biogeochemical markers, tropical river, Mekong River, Ham Luong River, Vietnam

Acknowledgments: The study was carried out by researchers of the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center and the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS according to their research projects: 1) Ekolan E3.4. Ecosystem of the Mekong River in the context of global climate change and anthropogenic impact; and 2) Molismological and biogeochemical foundations of homeostasis of marine ecosystems (state registration no. 121031500515-8).

For citation: Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A., Tkachenko, Yu.S. and Nguyen Trong Hiep, 2023. Hydrocarbon Composition of Water and Suspended Matter of the Ham Luong River (Southeast Asia). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 129–142.

Введение

Суммарная площадь внутренних водоемов Вьетнама составляет около 6 % территории страны, поэтому водные ресурсы имеют существенное значение для экономики региона [1]. Река Меконг – одна из самых важных речных систем Вьетнама и двенадцатая по длине река в мире [2]. Одним из самых больших по водности рукавов Меконга является р. Хамлуонг длиной 70 км, шириной 2800 м, средней глубиной 11.3 м и со средним расходом воды ¹⁾ 10.2 м³ с⁻¹.

Во Вьетнаме более трех тысяч рек и ручьев (свыше ста из них впадают в море), многие из которых с высокой степенью загрязнения воды. Наиболее загрязненными являются реки Кау, Дай, Тхивай, Донгнай, Меконг. Загрязнение этих рек обусловлено различными причинами. В докладе Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама за 2018 г. отмечается, что на территории водосборного бассейна рек загрязнение воды происходит из-за добычи полезных ископаемых. В среднем и нижнем течении рек (как правило, на этих участках расположены города, промышленные зоны, сельские поселения) их экологическое состояние продолжает ухудшаться вследствие попадания в воду всевозможных отходов. Степень загрязнения зависит от гидрологических факторов (их влияние возрастает в сухой сезон), а также от степени контроля за источниками загрязнения. Почти во всех экологически неблагоприятных районах причиной загрязнения являются органические вещества [3].

Природные воды представляют собой сложную смесь растворов минеральных солей и газов, а также органических соединений во взвешенной и растворенной формах. При этом содержание и качественный состав органики в водоеме определяются не только природными особенностями последнего, но и характером и степенью влияния человеческой деятельности на водный объект [4]. Важными факторами, влияющими на перераспределение органических веществ в воде, в том числе углеводов (УВ), являются также физико-химические показатели, такие как рН, соленость, температура и др. От величины рН зависит развитие и жизнедеятельность многих организмов, агрессивность воздействия воды на металлы и бетон. Величина рН воды также влияет на процессы превращения различных форм биогенных элементов и изменяет

¹⁾ 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.

токсичность загрязняющих веществ²⁾. Растворенный в воде кислород является одним из важнейших биогидрохимических показателей состояния среды. Он обеспечивает существование водных организмов и является характеристикой качества воды [5], используемой в различных хозяйственных целях. Дефицит кислорода чаще наблюдается в водных объектах с высокими концентрациями загрязняющих органических веществ и в водоемах, содержащих большое количество биогенных и гумусовых веществ. Концентрация кислорода в воде, кроме того, определяет направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений²⁾.

Для идентификации генезиса УВ применяются различные маркеры. С целью дифференциации аллохтонного и автохтонного происхождения нередко используют соотношение терригенных и автохтонных соединений C_{31}/C_{19} , C_{31}/C_{17} , соотношение низкомолекулярных и высокомолекулярных гомологов (LWH/HWH) [6, 7]. Отдельные биомаркеры позволяют уточнить характер биогенной природы соединений, в частности оценить вклад травянистой и древесной растительности в формирование аллохтонной составляющей поступающих в донные отложения УВ – это, например, соотношения C_{31}/C_{29} , ACL [7]. Для дифференциации нефтяного и биогенного происхождения обнаруженных УВ используются такие соотношения, как индекс нечетности (CPI), в частности CPI_2 (рассчитанный для высокомолекулярной части спектра), ACL , LWH/HWH , а также соотношение изопреноидных алканов (пристана и фитана) между собой и с отдельными нормальными гомологами (Pr/Ph , C_{17}/Pr , C_{18}/Ph) [6, 7].

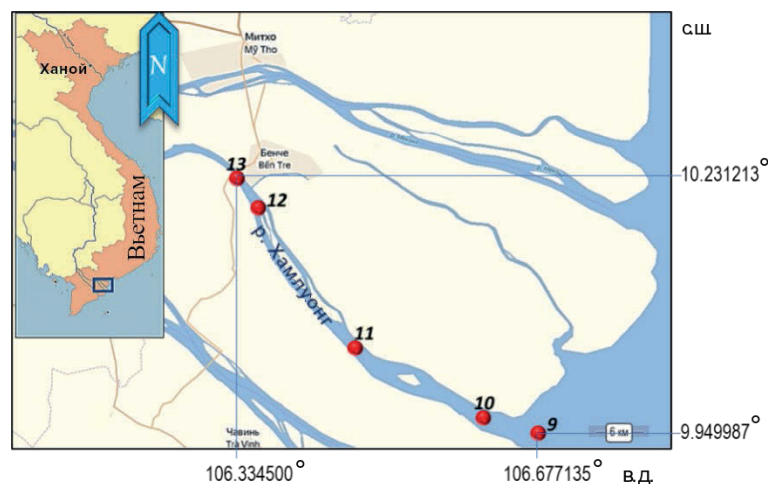
Целью работы является оценка качественного и количественного состава углеводородов воды и взвеси р. Хамлуонг с учетом трансформации указанных соединений при их миграции в системе вода – взвесь.

Материал и методы

Материалом послужили пробы воды, отобранные в ноябре – декабре 2022 г. на протяжении русла р. Хамлуонг (ст. 9–13) с учетом расположения по ее берегам крупных промышленных и городских объектов (рис. 1). Отбор на каждой станции проводился в поперечном сечении русла в трех точках (правый и левый берег, по центру). В центральной части русла отбирали придонную и поверхностную воду, у берегов – только поверхностную. Нумерация станций сохранена в соответствии с планом-программой совместных с Южным отделением СРВТН и ТЦ исследований рек Вьетнама. Химико-физические характеристики поверхностной воды (рН, Eh, соленость, температура) р. Хамлуонг были определены *in situ* многопараметрическим зондом *YSI Professional Digital Sampling System (ProDSS)* сотрудниками лаборатории анализа окружающей среды Южного отделения СРВТН и ТЦ. Пробоподготовка проводилась в лабораторных условиях экстрагированием проб воды гексаном³⁾.

²⁾ ГОСТ 17.1.1.01-77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения. Введ. 1978–07–01.

³⁾ Практическое руководство по химическому анализу элементов водных экосистем. Приоритетные токсиканты в воде, донных отложениях, гидробионтах / Под ред. Т. О. Барабашина. Ростов н/Д : МиниТайп, 2018. 436 с.



Р и с . 1 . Схема станций отбора проб воды в р. Хамлуонг (Вьетнам) во влажный сезон, 2022 г.

Fig. 1. Map of water sampling stations in the Ham Luong River (Vietnam) during the wet season, 2022

Полученный экстракт очищали на стеклянной колонке, заполненной оксидом алюминия, для удаления полярных соединений, концентрировали до 1 мл и транспортировали в лабораторию ФИЦ ИнБЮМ.

Взвесь отбирали с использованием вакуумной фильтрации с применением вакуумного насоса, колбы Бунзена, фильтровальной установки и нитроцеллюлозных фильтров с диаметром пор 0.45 мкм. Объем профильтрованной речной воды варьировался в зависимости от скорости осаждения взвеси на фильтры и учитывался при пересчете содержания углеводов во взвеси. Фильтры высушивали в естественных условиях, хранили в эксикаторе и транспортировали в герметичных zip-пакетах.

Аликвоту экстракта (1 мкл) вводили микрошприцем в нагретый до 250 °С испаритель газового хроматографа «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Разделение УВ осуществляли на капиллярной колонке TR-1MS длиной 30 м, диаметром 0.32 мм и толщиной неподвижной фазы 0.25 мкм (*ThermoScientific*). Температура колонки программировалась от 70 до 280 °С (скорость подъема температуры 8 °С·мин⁻¹). Поток газ-носителя (азот) в колонке – 2.5 мл·мин⁻¹ без деления потока. Температура детектора 320 °С.

Количественное определение содержания УВ проводили путем абсолютной калибровки ПИД смесью УВ (стандартный образец нефтяных углеводов *ASTMD2887 Reference Gas Oil* (фирма *SUPELCO*, США)), n-алканов – по стандартному образцу парафиновых УВ в гексане с массовой концентрацией каждого компонента 200 мкг·мл⁻¹, пристана + фитана – 100 мкг·мл⁻¹ в гексане (фирма *SUPELCO*, США).

Определение УВ и n-алканов проводили на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Для обработки результатов при определении концентраций УВ использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0» (метод абсолютной калибровки и процентной нормализации).

Для оценки благополучия вод исследуемого района по отдельным показателям были использованы индексы *US-EPA* ⁴⁾, применимые для водоемов различных климатических зон, что делает возможным их использование и для тропических водоемов [8, 9]. Корреляционный анализ проводили с помощью пакета анализа *Microsoft Excel 2010*. Силу корреляционной связи оценивали на основании коэффициента корреляции (*R*). Для оценки достоверности аппроксимации зависимостей линейной функцией использовали коэффициент аппроксимации (*R*²).

Маркеры генезиса УВ определяли по следующим соотношениям:

– CPI_2 (*Carbon Preference Index*) = $(1/2)\{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34} + C_{36})\}$;

– *Pr/Ph* (*pristane-phytane ratio*) – отношение пристана к фитану;

– *LWH/HWH* (*low molecular weight to high molecular weight*) – соотношение низкомолекулярных и высокомолекулярных гомологов;

– C_{31}/C_{19} – отношение *n*-алкана C_{31} к *n*-алкану C_{19} ;

– C_{31}/C_{17} – отношение *n*-алкана C_{31} к *n*-алкану C_{17} ;

– C_{31}/C_{29} – отношение *n*-алкана C_{31} к *n*-алкану C_{29} ;

– C_{17}/Pr – отношение *n*-алкана C_{17} к пристану;

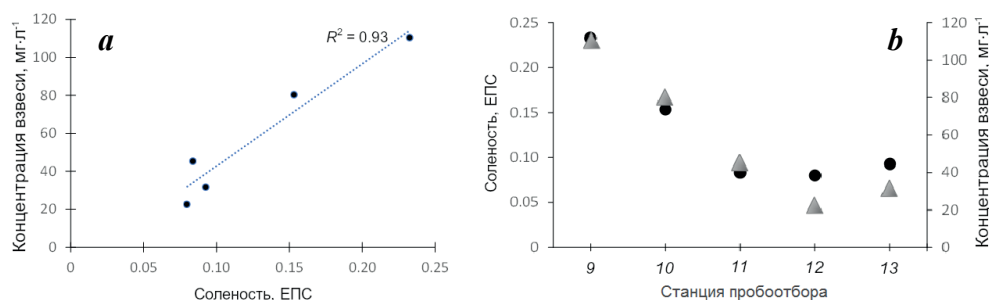
– C_{18}/Ph – отношение *n*-алкана C_{18} к фитану.

Результаты и обсуждение

Температура воды в районе исследований была около 29 °С (28.83–29.33 °С). Соленость варьировала в диапазоне 0.08–0.23 ЕПС и соответствовала пресной воде. При продвижении вниз по течению наблюдался закономерный рост данного показателя (рис. 2). На ст. 11–13 соленость была одинаковой (0.08–0.09 ЕПС), на ст. 10 – 0.15 ЕПС, а на самой мористой ст. 9 она возрастала до 0.23 ЕПС. Совместно с соленостью возрастало и содержание взвешенных веществ в воде ($R = 0.97$, $R^2 = 0.93$), увеличиваясь в зоне смешения (ст. 9) примерно в два раза (рис. 2, а). Содержание взвешенного вещества на станциях пробоотбора было в пределах 23–110 мг·л⁻¹ (рис. 2, б) с тенденцией к возрастанию при продвижении к устью реки. Следует отметить, что на большей части русла содержание взвеси в придонном слое было в среднем в 1.9 раза выше, чем в поверхностном. Исключение составила ст. 9, расположенная в устье реки, где содержание взвеси на поверхности было в 1.4 раза выше, чем в придонном слое.

Таким образом, при продвижении вниз по течению реки отмечен совместный рост показателей солености и содержания взвеси. В литературе описано явление маргинального фильтра [10], образующегося в зоне смешения река – море, когда при продвижении к солонowodным участкам при росте солености вплоть до 5 ЕПС наблюдается увеличение содержания взвеси в воде. Данный факт связывают с активными процессами коагуляции и флокуляции, когда под влиянием электролита растворенная органика, железо, алюминий

⁴⁾ Quality Criteria for Water 1986. Washington, DC, USA : Office of Water Regulations and Standards, United States Environmental Protection Agency, 1986. 394 p.



Р и с . 2 . Показатели солёности (ЕПС) и концентрация взвешенных веществ ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) в воде р. Хамлуонг (Вьетнам) во влажный сезон, 2022 г.: *a* – соотношение солёности и концентрации взвеси; *b* – солёность (кружки) и концентрация взвеси (треугольнички) на станциях пробоотбора

Fig. 2. Salinity (psu) and concentration of suspended solids ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) in the water of the Ham Luong River (Vietnam) during the wet season, 2022: *a* – the ratio of salinity and suspended matter concentration; *b* – salinity (dots) and suspended matter concentration (triangles) at sampling stations

и ряд других элементов переходят из раствора во взвесь. Вероятно, нарастание интенсивности данного процесса нам и удалось наблюдать в исследуемом районе даже при незначительном увеличении солёности воды.

По данным мониторинговых исследований⁵⁾, концентрация взвешенного вещества в рукавах р. Меконг, в частности р. Хамлуонг, значительно варьируется, изменяясь от 2.3 до $593 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ со средним значением 80.6. Концентрация взвеси сильно зависит от сезона, существенно снижаясь с апреля по ноябрь и возрастая с началом сезона муссонных дождей. Так, средние показатели⁵⁾ для сухого сезона – $36.9 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, а для влажного – $124 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. В материале, отобранном нами в декабре 2022 г., средняя концентрация взвешенного вещества составляла $58 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$.

Показатель pH воды на всех станциях колебался в диапазоне 7.4–7.6, что соответствует воде питьевого качества. По данным мониторинговых исследований⁵⁾, значения pH в нижнем течении р. Хамлуонг находятся в диапазоне 6.3–8.7 (среднее 7.7). Отмеченные нами показатели укладываются в данный диапазон и соответствуют целевым показателям⁴⁾ (6–9) *WQI_h* (индексы качества воды с целью защиты гидробионтов) [11].

Содержание растворенного кислорода также изменялось незначительно в диапазоне $5.14\text{--}5.57 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Содержание кислорода в воде соответствовало санитарным нормам⁶⁾ для рыбохозяйственных водоемов ($> 4 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), хотя и было несколько ниже равновесных концентраций для данного температурного диапазона ($7.62\text{--}7.52 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) [11], что указывает на активные биологические процессы в водах реки. Концентрация кислорода в нижнем течении

⁵⁾ Lower Mekong Regional Water Quality Monitoring Report. Vientiane, Lao : Mekong River Commission, 2018.

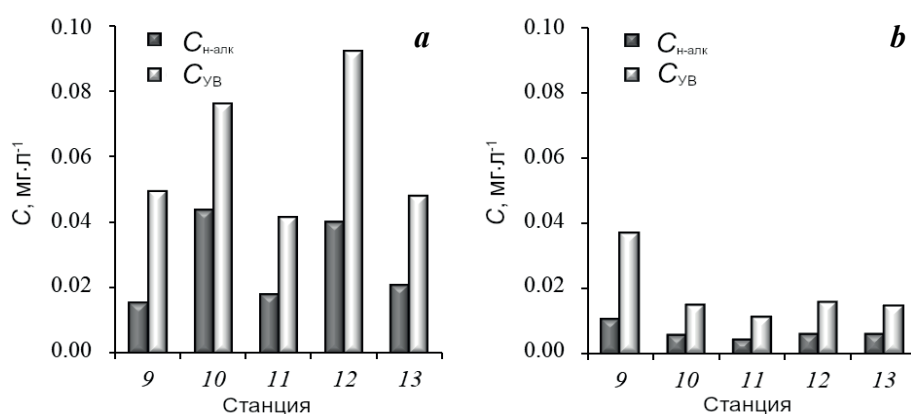
⁶⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552.

исследуемой реки находится в диапазоне 4.12–9.27 (среднее 6.45 мг·л⁻¹)⁵⁾. Полученные значения характерны для водоема и соответствуют целевому показателю (не менее 5 мг·л⁻¹).

Таким образом, исследованные показатели были типичными для р. Хамлуонг и находились в пределах, свидетельствующих о благополучном состоянии водоема в исследуемый сезон.

Содержание УВ в воде исследуемого рукава р. Меконг (р. Хамлуонг) колебалось в диапазоне 0.042 до 0.076 мг·л⁻¹ (среднее 0.061 ± 0.019 мг·л⁻¹) (рис. 3). Данные показатели являются достаточно высокими и превышают санитарные нормы (0.05 мг·л⁻¹) для рыбохозяйственных водоемов⁶⁾ или приближаются к данному значению. Поскольку исследуемая река используется как для рыбного промысла, так и для аквакультуры, данные показатели характеризуют ее неудовлетворительное состояние. Содержание н-алканов в воде составляло 0.015–0.043 мг·л⁻¹ (среднее 0.028 ± 0.012 мг·л⁻¹). Доля н-алканов от общего содержания УВ составляла от 31 до 57 % (среднее 44 ± 8 %). Пониженная доля н-алканов от УВ была на ст. 9, находящейся в районе впадения реки в море. В целом концентрации УВ и н-алканов изменялись синхронно ($R = 0.91$).

Содержание УВ во взвешенном веществе находилось в диапазоне 0.011–0.37 мг/л (среднее 0.019 ± 0.009 мг·л⁻¹) (рис. 3). Следует отметить рост содержания УВ во взвешенной фазе в районе ст. 9, по сравнению с участками реки, находящимися выше по течению. Данный факт, как отмечалось выше, может быть связан с переходом веществ из растворенного во взвешенное состояние при увеличении солёности воды в зоне смешения река – море [12]. Содержание УВ во взвеси коррелировало с ее общим количеством ($R = 0.78$), что говорит о существенном вкладе биологических процессов в формирование взвешенного вещества. Концентрация н-алканов была от 0.004 до 0.10 мг·л⁻¹ (среднее 0.006 ± 0.002 мг·л⁻¹), что составляло 28–41 % (среднее 36 ± 4 %) углеводородной смеси. Судя по небольшому среднеквадратичному



Р и с . 3 . Концентрации углеводородов (мг·л⁻¹) в воде (а) и взвешенном веществе (б) р. Хамлуонг (Вьетнам) во влажный сезон, 2022 г.

F i g . 3 . Hydrocarbon concentrations (mg·L⁻¹) in water (A) and suspended matter (B) of the Ham Luong River (Vietnam) during the wet season, 2022

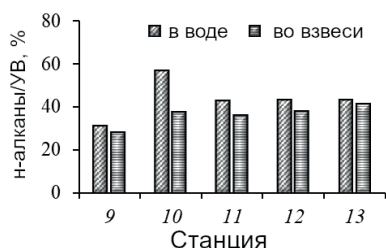


Рис. 4. Соотношение углеводородов и н-алканов (%) в воде и взвешенном веществе р. Хамлуонг (Вьетнам) во влажный сезон, 2022 г.

Fig. 4. Hydrocarbon and n-alkane ratio (%) in water and suspended matter of the Ham Luong River (Vietnam) during the wet season, 2022

отклонению, эта доля была достаточно постоянной, что может быть следствием единообразия источников поступления и механизмов преобразования УВ на различных станциях пробоотбора. Содержание УВ и н-алканов в смеси изменялось синхронно ($R = 0.98$). Как для воды, так и для взвеси доля н-алканов от УВ в районе впадения реки в море сокращалась (рис. 4).

На долю УВ, находящихся во взвешенном веществе, приходилось от 20 до 75 % (среднее 34 ± 21 %) УВ в воде в целом. То есть разброс значений был достаточно широким. Этот показатель для н-алканов колебался в пределах 13–68 % (среднее 29 ± 20 %), что также характеризует нестабильность данного показателя.

На всех станциях в нефилтрованной пробе воды были идентифицированы н-алканы от C_{17} до C_{32} . На ст. 11–13 также выявлено соединение C_{33} . В целом распределение н-алканов было равномерным, что может указывать на присутствие соединений нефтяного происхождения (рис. 5). При этом отмечен пик C_{17} , ассоциированный с планктонной продукцией [6]. Выделяется другая группа максимумов C_{26} – C_{29} . Нечетные соединения в этом диапазоне генетически связаны с наземной растительностью (C_{27} , C_{29}) [6]. Четные соединения (C_{26} , C_{28}), вероятно, связаны с бактериальным синтезом⁷⁾ [13], а также соответствуют наличию гумусовой примеси в органическом веществе и продукции макрофитов [14]. Учитывая, что пробоотбор осуществлялся в период муссонных дождей, нельзя исключить смыв гумусовых соединений с прилегающих территорий.

Во взвешенном веществе присутствовали н-алканы в диапазоне C_{17} – C_{32} . Соединения с большей молекулярной массой зафиксированы не были. На ст. 13 самым тяжелым гомологом был C_{30} , а на ст. 10 – C_{31} . Основной пик в составе н-алканов взвеси приходился на C_{17} (19–27 %), что обусловлено активной первичной продукцией [15, 16], которая интенсифицируется во влажный сезон за счет активного поступления биогенных соединений и высокого насыщения воды кислородом [16]. Вероятно, анализируемая взвесь содержала в своем составе значительное число фитопланктонных организмов. На ст. 9 и 10 второй пик приходится на C_{21} (13 и 16 %) также фитопланктонного генезиса. В целом график распределения н-алканов во взвеси был более сглаженным, чем график их распределения в воде, что может свидетельствовать о более глубокой степени трансформации органических веществ во взвешенном веществе. Таким образом, н-алканы, присутствующие во взвешенной фазе, имеют преимущественно автохтонную природу и связаны с фитопланктонной и бактериальной продукцией.

⁷⁾ Пошибаева А. Р. Биомасса бактерий как источник углеводородов нефти : автореферат дис. ... кандидата химических наук. Москва, 2015. 24 с.

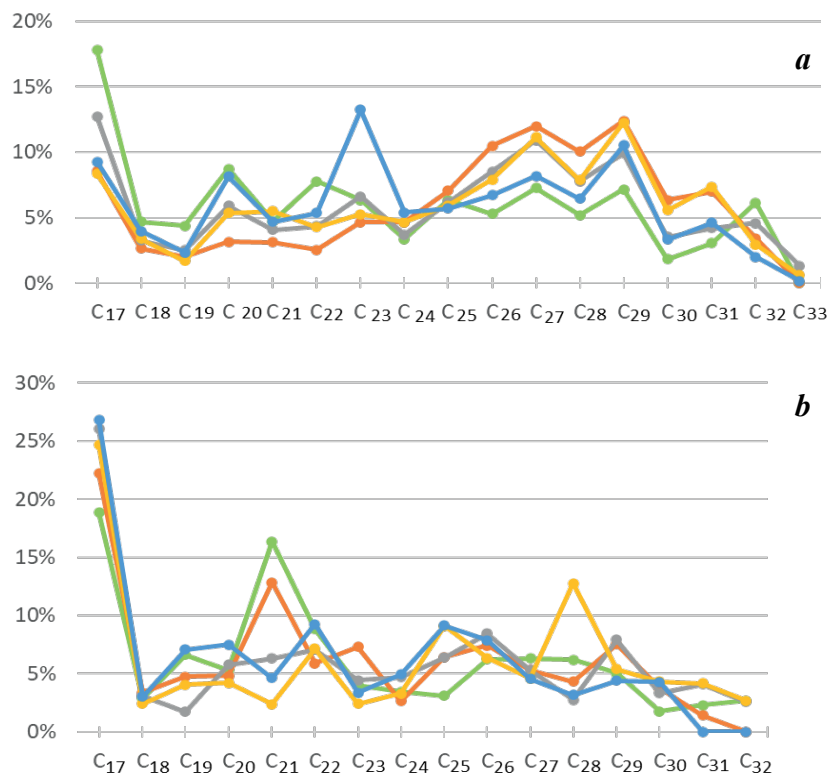


Рис. 5. Распределение *n*-алканов в воде (а) и во взвешенном веществе (б) р. Хамлуонг (Вьетнам) во влажный сезон, 2022 г.: ст. 9 (—), ст. 10 (—), ст. 11 (—), ст. 12 (—), ст. 13 (—)

Fig. 5. Distribution of *n*-alkanes in water (a) and suspended matter (b) of the Ham Luong River (Vietnam) during the wet season, 2022: St. 9 (—), St. 10 (—), St. 11 (—), St. 12 (—), St. 13 (—)

С целью идентификации потенциальных источников поступления УВ были рассчитаны отдельные маркеры генезиса органического вещества (таблица). Для воды индексы нечетности для высокомолекулярной области были примерно одинаковыми и немного превышали единицу, что может быть следствием наличия нефтяного загрязнения. Соотношение пристана и фитана также характеризовалось низкими значениями, что характерно для наличия нефти. Соотношение *n*-алкана C_{17} к пристану, C_{17}/Pr (таблица) характеризует наличие свежей нефти. При этом маркер $C_{18}/Ph \approx 1$ (таблица), что говорит о наличии как свежих, так и деградированных нефтепродуктов.

Известно, что для взвешенного вещества характерны значения $CPI \geq 1$ [6]. В настоящем исследовании для высокомолекулярной области данное соотношение было ниже единицы, что говорит о преобладании биогенных и трансформированных нефтяных УВ во взвешенной фазе вещества. Соотношение пристана к фитану Pr/Ph (таблица) характеризует наличие нефти, а C_{18}/Ph – преобладание ее биodeградированных компонентов.

Значения рассчитанных биогеохимических маркеров для воды и взвешенного вещества р. Хамлуонг (Вьетнам), 2022 г.

Calculated biogeochemical marker values for water and suspended matter of the Ham Luong River (Vietnam), 2022

Маркер / Marker	Вода / Water					Взвешенное вещество / Suspended matter				
	Номер станции / Station number									
	9	10	11	12	13	9	10	11	12	13
<i>CPI₂</i>	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	0.5	0.7	0.7	0.4	0.6
<i>Pr/Ph</i>	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
<i>LWH/HWH</i>	0.9	0.3	0.5	0.5	0.4	1.4	1.2	1.0	0.8	1.4
<i>C₃₁/C₁₉</i>	0.7	3.5	1.7	4.3	2.0	0.3	0.3	2.3	1.0	0.0
<i>C₃₁/C₁₇</i>	0.2	0.8	0.3	0.9	0.5	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0
<i>C₃₁/C₂₉</i>	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4	0.5	0.2	0.5	0.8	0.0
<i>C₁₇/Pr</i>	21.0	49.2	103.4	43.8	19.5	5.7	25.1	64.0	24.3	30.2
<i>C₁₈/Ph</i>	0.9	0.9	1.0	0.7	1.0	0.3	0.6	0.4	0.3	0.5

Таким образом, наблюдается ситуация, когда в воде содержится и свежая и деградированная нефть, а во взвешенном веществе преобладают биodeградированные соединения нефтяной природы. Известно, что в процессе седиментации нефтяные компоненты активно разлагаются [17], что и является причиной наличия трансформированных соединений во взвешенной фазе. В теплых водах р. Хамлуонг закономерно ожидать активных процессов биодеградации привнесенных органических соединений. В отдельных случаях даже в арктических районах океана, несмотря на низкие температуры, трансформация антропогенных углеводов происходит настолько быстро, что в воде и донных отложениях в основном доминируют природные соединения [18].

Маркеры, позволяющие дифференцировать автохтонные и аллохтонные соединения (*C₃₁/C₁₇*, *C₃₁/C₁₉*), указывают на преобладание в воде соединений, поступающих с суши. Во взвеси, судя по значениям маркеров, аллохтонные соединения имеют подчиненное значение, что связывает взвешенное вещество с продукционно-деструкционными процессами в русле реки. Соотношение *LWH/HWH* (таблица) для воды соответствует преобладанию терригенных УВ [18]. В случае со взвешенным веществом этот маркер имеет высокие значения, что иногда может быть признаком свежего поступления нефти. Основной вклад в сумму низкомолекулярных гомологов в данном случае вносят *C₁₇* и *C₂₁*, доля которых в разы превышает удельный вес остальных n-алканов. Поэтому можно говорить о преобладании автохтонных соединений, что свидетельствует об активных продукционных процессах в водоеме.

УВ в воде имеют смешанное происхождение и содержат как биогенные компоненты автохтонного и аллохтонного происхождения, так и следы нефтяного загрязнения. Во взвешенном веществе наряду с биогенными соединениями отмечаются также биodeградированные соединения нефтяной

природы. Органические соединения как аллохтонного, так и нефтяного происхождения поступают с водосборных территорий р. Хамлуонг (что особенно выражено во влажный сезон), а также с поверхности реки. В дальнейшем при переходе во взвешенное состояние эти соединения претерпевают биотрансформацию. В результате состав n-алканов в пробах взвешенного вещества и интегральных пробах воды существенно различается. Данный процесс идет активно, в том числе из-за высокой температуры воды, характерной для тропического региона. На активные биологические процессы в водах реки также указывает несколько сниженное относительно равновесных концентраций содержание кислорода, который, вероятно, интенсивно расходуется на процессы окисления органических соединений.

Заключение

Значения отдельных физико-химических показателей водной среды (рН, O₂, соленость, температура, концентрация взвешенного вещества) являются характерными для р. Хамлуонг и находились в пределах, свидетельствующих о благополучном состоянии водоема в исследуемый сезон.

Содержание УВ в воде исследуемого рукава Меконга (р. Хамлуонг) колебалось в диапазоне 0.042 до 0.076 мг·л⁻¹, в среднем составляя 0.061 ± 0.019 мг·л⁻¹. Данные показатели являются достаточно высокими и превышают санитарные нормы (0.05 мг·л⁻¹) для рыбохозяйственных водоемов или приближаются к данному значению.

Содержание УВ во взвешенном веществе находилось в диапазоне 0.011–0.37 мг·л⁻¹, в среднем 0.019 ± 0.009 мг·л⁻¹. Отмечен рост содержания УВ во взвешенной фазе в районе впадения реки в море, по сравнению с участками реки, находящимися выше по течению.

УВ в воде имеют смешанное происхождение и содержат в своем составе как биогенные компоненты автохтонного и аллохтонного происхождения, так и следы нефтяного загрязнения. Во взвешенном веществе наряду с биогенными соединениями отмечаются также биodeградированные соединения нефтяной природы. В результате активного смыва с водосборного бассейна р. Хамлуонг (что особенно выражено во влажный сезон) и с поверхности реки органические соединения различного происхождения при переходе во взвешенное состояние претерпевают значительную биотрансформацию. В результате состав n-алканов в пробах взвешенного вещества и в интегральных пробах воды существенно различается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экология внутренних вод Вьетнама / под ред. Д. С. Павлова, Д. Д. Зворыкина. Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2014. 435 с. doi:10.13140/2.1.5079.6325
2. *Динь Нгуен Ан* Экологическая безопасность морской среды во Вьетнаме: современные проблемы и вызовы // Независимый Вьетнам: национальные интересы и ценности. Москва : ИДВ РАН, 2021. № 1. С. 149–162. doi:10.24412/cl-36362-2021-1-149-162

3. Хемозекологический мониторинг состояния вод в реке Хамлуонг в отношении тяжелых металлов и металлоидов (дельта реки Меконг, Вьетнам) / Н. Н. Терещенко [и др.] // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий : материалы VII Международной научно-практической конференции*, г. Майкоп, 15–19 мая 2023 г. Майкоп : ИП Кучеренко В.О., 2023. С. 214–221.
4. *Рижинашвили А. Л.* Показатели содержания органических веществ и компоненты карбонатной системы в природных водах в условиях интенсивного антропогенного воздействия // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия*. 2008. № 4. С. 90–101. EDN KVXWMV.
5. *Пономарев А. Я.* Растворенный кислород как важнейший биогидрохимический показатель качества воды // *Научный альманах*. 2015. № 12-2. С. 146–148. EDN VKMDWB. doi:10.17117/na.2015.12.02.146
6. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). Москва : *Научный мир*, 2013. 432 с. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1917147 (дата обращения: 23.07.2023).
7. Sources and distribution of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China / X. C. Wang [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2006. Vol. 52. P. 129–138. doi:10.1016/j.marpolbul.2005.08.010
8. *Prati L., Pavanello R., Pesarin F.* Assessment of surface water quality by a single index of pollution // *Water Research*. 1971. Vol. 5, iss. 9. P. 741–751. doi:10.1016/0043-1354(71)90097-2
9. Water quality assessment of streams and wetlands in a fast growing East African city / N. De Troyer [et al.] // *Water*. 2016. Vol. 8, iss. 4. 123. doi:10.3390/w8040123
10. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747. EDN YJGOHJ.
11. Water Quality Degradation in the Lower Mekong Basin / R. Sor [et al.] // *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 11. 1555. doi:10.3390/w13111555
12. *Немировская И. А.* Углеводороды в океане (снег-лед-вода-взвесь-донные осадки). Москва : *Научный мир*, 2004. 328 с. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_65015 (дата обращения: 23.07.2023).
13. Ауторегуляция стрессового ответа микроорганизмов / Ю. А. Николаев [и др.] // *Микробиология*. 2006. Т. 75, № 4. С. 489–496. EDN OPCXJV.
14. Система Баренцева моря / Под ред. А. П. Лисицына. Москва : ГЕОС, 2021. 672 с.
15. *Ташлыкова Н. А., Куклин А. П., Базарова Б. Б.* Первичная продукция фитопланктона, эпифитных водорослей и высших водных растений в протоках дельты реки Селенги // *Вестник КрасГАУ*. 2009. № 9. С. 106–111. EDN KYFJHT.
16. *Yáñez-Arancibia A., Day J.* Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon-estuarine system in the Southern Gulf of Mexico // *Oceanologica Acta*. 1982. Vol. 5, iss. 4. P. 431–440.
17. *Немировская И. А., Коченкова А. И., Храмова А. В.* Углеводороды на геохимическом барьере Северная Двина – Белое море // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47, № 3. С. 281–290. EDN RZVOPO. doi:10.31857/S0321059620030153
18. *Немировская И. А.* Нефть в пограничных областях арктических морей // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2017. Т. 28, № 1. С. 41–55. EDN ZGSVOZ. doi:10.21513/0207-2564-2017-1-41-32

Поступила 01.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 04.06.2023 г.; принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

Об авторах:

Соловьёва Ольга Викторовна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1283-4593**, **Scopus Author ID: 57208499211**, **ResearcherID: X-4793-2019**, *kozl_ya_oly@mail.ru*

Тихонова Елена Андреевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2); кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X**, **Scopus Author ID: 57208495804**, **ResearcherID: X-8524-2019**, *tihonoval@mail.ru*

Ткаченко Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2); **ORCID ID: 0009-0001-1752-1043**, *yulechkatkachenko.90@mail.ru*

Нгуен Чонг Хиеп, заведующий лабораторией, Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (740500, Вьетнам, Хошимин, ул. 3/2, район 10, 3), кандидат химических наук, *hiepnguyen@vrtc.org.vn*

Заявленный вклад авторов:

Соловьёва Ольга Викторовна – постановка задачи, анализ полученных результатов, обсуждение результатов, написание статьи

Тихонова Елена Андреевна – литературный обзор, расчет биогеохимических индексов, обсуждение результатов

Ткаченко Юлия Сергеевна – подготовка образцов к определению в них углеводов, оформление статьи

Нгуен Чонг Хиеп – участие в пробоотборе, измерение физико-химических параметров воды

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.