

## ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ РТУТЬЮ В КРУПНЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ДЕЛЬТАХ АФРИКИ И АЗИИ

*А. В. Михайленко, Д. А. Рубан\**

Южный федеральный университет,

г. Ростов-на-Дону, Россия

\*ruban-d@mail.ru

### Аннотация

Быстрый рост урбанизации в крупных речных дельтах усиливает антропогенное воздействие на водные объекты, имеющие огромное значение для устойчивости уникальных аквальных ландшафтов и снабжения населения питьевой водой. В частности, происходит загрязнение воды ртутью из различных источников. Последние должны быть установлены для лучшей координации природопользования. Цель настоящей работы – обобщение научной информации об источниках загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки. Материал для исследования собран с помощью международной библиографической системы по стандартизированным поисковым запросам с последующей «ручной» фильтрацией и выделением требуемых данных. Аналитические процедуры предполагали не только систематизацию этих данных, но и оценку их четкости, а также типизацию источников загрязнения. Установлено, что информация о повышенных концентрациях ртути в воде имеется для шести крупных урбанизированных дельт, из которых наиболее загрязнены дельты Нила, Меконга и Нигера. Источники загрязнения разнообразны и связаны, в частности, с горно- и нефтедобывающей деятельностью, сельским хозяйством, поступлением сточных вод и отходов. Некоторые загрязнители не связаны с урбанизацией или располагаются на удалении от дельт. Выявлено, что информация об источниках загрязнения воды ртутью не всегда конкретна, во многих случаях их значимость не аргументируется, а лишь предполагается, исходя из общих представлений. Практическая значимость сделанных выводов определяется указанием на возможные факторы нарушения устойчивости природопользования в урбанизированных дельтах. Перспективы последующих исследований связаны, прежде всего, с расширением географического фокуса и совершенствованием подходов к сбору и критической оценке научной информации о разных аспектах антропогенной нагрузки на уникальные природные ландшафты.

**Ключевые слова:** аквальные ландшафты, антропогенная нагрузка, библиографический анализ, геоэкологические проблемы, города, загрязнение окружающей среды, качество воды, речные дельты, сточные воды, тяжелые металлы, урбанизация

**Для цитирования:** Михайленко А.В., Рубан Д.А. Источники загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Африки и Азии. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 86-98. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-86-98

*Original article*

## SOURCES OF WATER POLLUTION BY MERCURY IN LARGE URBANIZED DELTAS OF AFRICA AND ASIA

*Anna V. Mikhailenko, Dmitry A. Ruban\**

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

\*ruban-d@mail.ru

### Abstract

Urbanization of large river deltas strengthens anthropogenic pressure on water objects, which are of utmost importance for sustainability of aquatic landscapes and freshwater provision. The aim of the present work was to synthesize the scientific information about sources of water pollution by mercury in large urbanized deltas of

Asia and Africa. The materials for this study were collected with an international bibliographical database via standardized search, with subsequent “manual” filtration and data extraction. The analytical procedures included the data systematization and evaluation of data certainty, as well as typization of the pollution sources. It was established that the evidence of elevated concentrations of mercury in water is available from six deltas, from which the most polluted are those of the Nile, the Mekong, and the Niger. The pollution sources are diverse and related, particularly, to mining and petroleum extraction, agriculture, and discharge of wastewater and solid waste. Some sources are not linked to urbanization or located far from deltas. The information about the pollution sources is often uncertain. The practical importance of the findings is determined by the indication of the possible factors of sustainability disturbance in urbanized deltas. Prospects for further research are associated, first of all, with expanding the geographical focus and improving approaches to collecting and critically evaluating scientific information on various aspects of anthropogenic pressure on unique natural landscapes.

**Keywords:** aquatic landscape, anthropogenic pressure, bibliographical survey, geoeological problems, cities, environmental pollution, water quality, river deltas, wastewater, heavy metals, urbanization

**For citation:** Mikhailenko A.V., Ruban D.A. Sources of water pollution by mercury in large urbanized deltas of Africa and Asia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(4): 86-98. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-86-98

## Введение

Урбанизация оказывает существенное влияние на крупные речные дельты, которое усилилось в последние десятилетия [1, 2]. Соответствующие процессы имеют не только историко-культурные предпосылки, но и стимулируются богатством природных ресурсов дельт, их ключевым логистическим расположением. Урбанизация дельтовых пространств увеличивает спрос на воду со стороны растущего населения, а также поднимает вопрос об адекватной защите уникальных аквальных ландшафтов. При решении обеих задач, неразрывно связанных с устойчивым развитием крупных территорий, огромное значение имеет значительное антропогенное загрязнение воды из-за избыточного формирования отходов и стоков, а также промышленной и транспортной деятельности в пределах городов. Характерными примерами являются дельты рек Меконг [3] и Янцзы [4]. Стоит подчеркнуть, что такое загрязнение представляет собой комплексный феномен, в связи с чем видится необходимым рассмотрение его отдельных аспектов, таких как загрязнение воды ртутью.

Предметом настоящей работы выступает загрязнение ртутью речных дельт в условиях урбанизации. Ртуть является очень токсичным элементом, повышенные концентрации которого в воде представляют опасность для биоты и здоровья человека [5–7]. Ее поступление с городских территорий создает риски для аквальных ландшафтов [8]. Промышленная, транспортная и прочая деятельность, типичная для городов, способствует росту содержания ртути в водных объектах дельт, и соответствующее загрязнение часто оказывается неизбежным. Объектом работы является литературная информация о факторах загрязнения воды ртутью в крупных дельтах. Предыдущие исследования показали, что возможные источники этого тяжелого металла, связанные с городскими территориями, разнообразны, и точно установить их удастся не всегда [9–11]. Однако знания о них необходимы как для концептуальных разработок, так и для лучшего планирования природоохранной деятельности и сопутствующих экологических мероприятий. Следовательно, отдельные фрагменты этих знаний, рассеянные в международной научной литературе, нуждаются в обобщении, систематизации и критическом осмыслении.

Целью настоящей работы является синтез имеющейся научной информации об источниках загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки. Актуальность цели определяется быстротой урбанизацией крупных дельт [1, 2] и потребностью в надежной информационной основе для корректного понимания механизмов загрязнения водной среды токсичным металлом. Для успешного научного решения соответствующих геоэкологических проблем необходимо обобщение опубликованных данных о факторах загрязнения, а также оценка

их качества, что также позволит наметить перспективы последующих исследовательских работ. Отмеченный географический фокус обусловлен, с одной стороны, интенсивным протеканием процессов урбанизации в дельтах именно азиатских и африканских рек, а, с другой, – наличием достаточного количества новых знаний именно об этих дельтах. Действительно, именно на отмеченных континентах в крупных дельтах концентрируется городское население, что делает их особо подверженными значительной антропогенной нагрузке. Совместное рассмотрение дельт Азии и Африки определяется сходными социально-экономическими условиями формирования отмеченной нагрузки, а также необходимостью обобщения как можно большего количества материала. На других континентах крупные дельты или не испытывают урбанизации, или для них отсутствует свежая информация о загрязнении воды ртутью. Работа сочетает элементы обзора с аналитическими процедурами, связанными с определением качества научной информации.

### **Материалы и методы исследования**

Информация об источниках ртутного загрязнения воды в крупных речных дельтах может быть получена из научной литературы, наиболее значимая часть которой включает публикации в международных научных журналах. Поиск данных может быть осуществлен с помощью библиографической системы «Scopus», пригодность которой для решения подобного рода задач подтверждена ранее проведенными исследованиями [12–14]. Оптимальной организации поиска способствовали рекомендации, обозначенные в протоколе PRISMA [15].

Материал для настоящей работы был собран в три приема (рис. 1). Исходный поиск осуществлялся с помощью строгого и расширенного запросов в отмеченной выше библиографической системе. Такая двойственность объясняется обнаруженной неинформативностью одного лишь строгого запроса. Стандартизированные формулы запросов (рис. 1) позволяют избежать произвольности в выборе источников. Сформированные выборки литературных источников анализировались на предмет релевантности. Интерес представляли только те статьи, которые были опубликованы в течение последних десяти лет, посвящены крупным речным дельтам азиатских и африканских рек с высоким уровнем урбанизации, содержат информацию об источниках ртути конкретно в водной среде (чаще всего, речной воде). Под крупными дельтами понимаются те, что сформированы реками длиной не менее 1000 км и имеют площадь не менее 5–10 тыс. км<sup>2</sup>. О высоком уровне урбанизации можно судить по наличию в дельте или, как минимум, одного крупного города или нескольких городов. Из общего количества собранной литературы только 12 источников были признаны релевантными (рис. 1), и такое количество вполне объяснимо небольшим числом исследований в силу не только их тематической специфичности, но и методологической сложности (последняя ограничивает их широкое применение). Сравнительно узкий временной диапазон (10 лет) был выбран для обеспечения однородности информации. Это связано с изменением урбанизации в дельтах, трансформацией факторов загрязнения, совершенствованием методик изучения ртути в водной среде и соответствующего оборудования в течение даже сравнительно коротких промежутков времени.

Далее содержание релевантной литературы подвергалось тщательному изучению для выделения информации об источниках загрязнения и оценке ее общего характера и качества. Попутно фиксировались сведения о концентрациях металла в воде, однако настоящая работа не ставит целью критическое рассмотрение последних.

Собранный материал позволил реализовать три аналитические процедуры. Во-первых, разрозненные блоки информации сводились воедино для краткой характеристики источников загрязнения ртутью каждой из рассмотренных дельт. Во-вторых, критически рассматривалась аргументация каждого предлагаемого источника загрязнения. Это важно для понимания четкости соответствующей научной информации, что относится к ее качеству. В-третьих, для всех дельт проводилось разделение загрязнителей на удаленные (расположенные за пределами дельты) и локальные (расположенные непосредственно в пределах дельты). Также выделялись источники загрязнения, специфичные для дельт и специфичные для урбанизированных территорий.

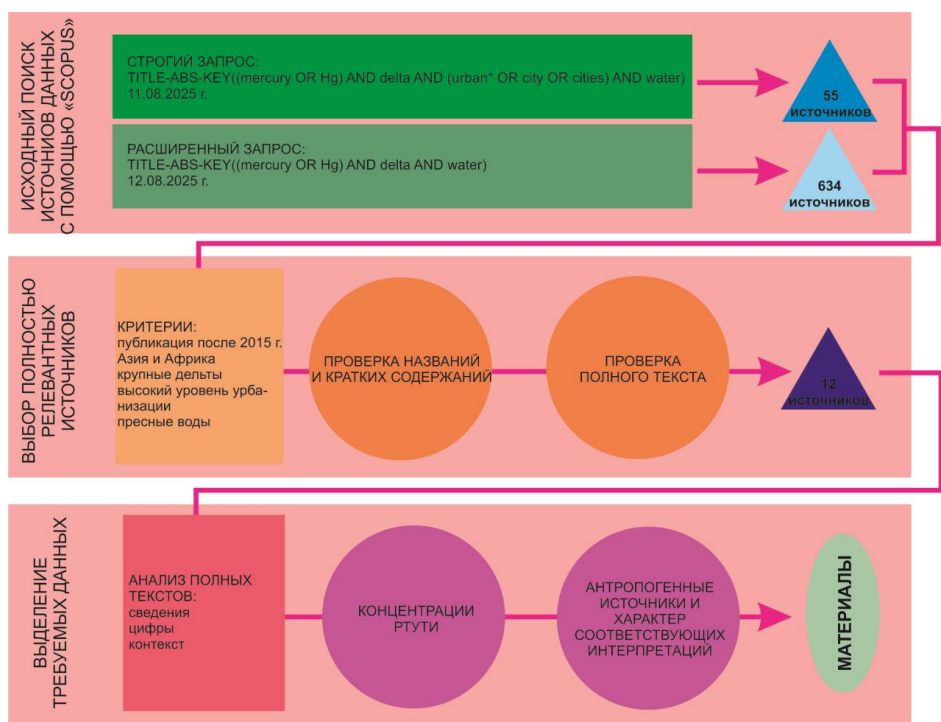


Рис. 1. Процедуры сбора материала для настоящей работы

Fig. 1. Procedures of the material collection for the present work

## Результаты

Крупные урбанизированные дельты четырех азиатских и двух африканских рек характеризуются наличием сведений о загрязнении воды ртутью (рис. 2). При этом стоит отметить их подверженность значительному антропогенному воздействию в целом (табл. 1), и загрязнение воды ртутью выступает лишь одним из проявлений последнего. Если рассматривать все крупные урбанизированные дельты Азии и Африки, то многие из них охвачены данным анализом. Наиболее существенным исключением оказывается дельта реки Ганг, для которой не обнаружилось свежей информации.



Рис. 2. Расположение рассматриваемых дельт

Fig. 2. Location of the considered deltas

Таблица 1  
Крупные урбанизированные дельты Азии и Африки, рассматриваемые в настоящей работе

Table 1

Large urbanized deltas of Asia and Africa considered in the present work

Река	Длина реки, км	Площадь дельты, тыс. км <sup>2</sup>	Сведения о значительном антропогенном воздействии	Анализируемые литературные источники о загрязнении воды ртутью
Меконг	~4500	~40	[16, 17]	[30]
Нигер	~4200	~70	[18, 19]	[25, 31]
Нил	6650	~25	[20]	[26, 27, 32]
Хонгха	~1150	~15	[21]	[34, 35]
Хуанхэ	~5500	~5,5	[22, 23]	[35]
Чжуцзян	2400	~55	[24]	[36–38]

Концентрации ртути в воде в рассматриваемых дельтах варьируют в широких пределах (как в пределах каждой дельты, так и между ними). Максимальные значения зафиксированы в дельтах Нила, Меконга и Нигера (табл. 2), где имеет место сильное загрязнение. Стоит отметить, что дельта реки Нигер рассматривается как своеобразная аномальная зона с очень высоким содержанием ртути в воде (*англ.* mercury hotspot), что свидетельствует об исключительной интенсивности антропогенного воздействия [25]. Однако степень загрязнения воды в дельте реки Нил оказывается еще большей [26, 27], и, следовательно, логично предположить наличие нескольких зон такого рода на рассматриваемых континентах. Подобные аномальные зоны ранее были установлены в других регионах мира (не для дельт) и имеют, напротив, природное происхождение [28, 29].

Таблица 2  
Содержание ртути в воде крупных урбанизированных дельт Азии и Африки

Table 2

Mercury content in water of the large urbanized deltas of Asia and Africa

Река	Концентрации ртути, нг/л	Пояснения	Источники информации
Меконг	190000	Валовое содержание, максимальное значение	[30]
Нигер	85000		[25]
	8000		[31]
Нил	398000		[26]
	153000		[27]
	80		[32]
Хонгха	120	Валовое содержание, максимальное значение, во время наводнений	[33]
	60	Содержание в растворенной форме, максимальное значение	[34]
	60	Содержание во взвешенной форме, максимальное значение	
Хуанхэ	<250	Валовое содержание, среднее значение	[35]
Чжуцзян	20	Валовое содержание, среднее значение	[36]

Специалистами выделялись разнообразные источники загрязнения воды ртутью. В дельте реки Меконг к ним относятся сельскохозяйственные стоки с обширных площадей возделывания риса [30]. Важность именно этого источника надежно аргументирована. Для дельты реки Нигер обращается внимание на вклад в загрязнение нефтедобычи и промышленной деятельности, а также сельского хозяйства, сбросов сточных вод и поступления ртути из атмосферы [25, 31]. Последний источник не является в полной мере антропогенным и связан с транспортировкой ртути воздушными массами на длительные расстояния. Отметим, что обозначенные для этой дельты источники загрязнения лишь предполагаются, обоснования в литературе не приведено.

Сравнительно больше работ посвящено дельте реки Нил. Ртутное загрязнение связывается с попаданием сточных вод (в том числе и промышленных) и мусора в водные объекты [26, 27, 32]. Лишь в одном случае соответствующие интерпретации обосновываются личными наблюдениями авторов. Однако последние фиксируют лишь потенциальные антропогенные угрозы и не устанавливают связи конкретно с ртутью. Большей частью выводы об источниках загрязнения делаются на основе предположений, ранее выдвигавшихся объяснений и касаются химического загрязнения в целом. Аналогичным образом указываются источники поступления ртути для дельты реки Хонгха, связываемые со сжиганием топлива, промышленной деятельностью и мусорными отходами [34, 35].

Несколько более определенными оказываются интерпретации, сделанные для дельты реки Хуанхэ. Здесь в качестве источников загрязнения рассматриваются объекты нефтяной и химической промышленности, сельскохозяйственная деятельность, различные стоки и отходы [35]. Но и в этом случае специалисты делают отсылку к собственным наблюдениям за антропогенным воздействием, частично опираясь на предположения, исходящие из общетеоретических знаний.

В дельте реки Чжуцзян загрязнение воды ртутью относительно невелико, однако его источники рассматривались в целом ряде работ с детальными интерпретациями. В одной из них аргументировано, что наиболее значимым из них является горнодобывающая деятельность далеко за пределами дельты, при этом меры по борьбе с загрязнением на территории последней вполне эффективны [36]. Интерпретации другой исследовательской группы в целом согласуются с таким объяснением [37]. Еще одна статья сфокусирована на поступлении ртути из атмосферы: тщательный анализ свидетельствует о предельно малом (около 1 %) вкладе этого источника, тогда как сточные воды и образовавшиеся при их очистке илы могут в большей степени способствовать загрязнению [38].

Обобщая вышесказанное, можно отметить разнообразие источников загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах. Далее имеет смысл подразделить загрязнители на группы в зависимости от их удаленности от дельты и специфики (табл. 3).

Анализ собранного материала показывает, что локальные источники загрязнения зафиксированы для всех рассмотренных дельт, тогда как удаленные – лишь для некоторых из них (табл. 3). К последним можно отнести атмосферный перенос и горнодобывающую деятельность.

Многие речные дельты известны своим значительным сельскохозяйственным потенциалом [39] и существенными запасами углеводородного сырья [40–42]. Следовательно, связанные с их эксплуатацией виды деятельности можно рассматривать в качестве специфичных для дельт источников загрязнения. Действительно, они установлены в более чем половине случаев (табл. 3). Важно, что вода почти всех дельт загрязняется за счет поступления ртути из источников, связанных с процессами урбанизации (табл. 3).



Таблица 3

Основные типы источников загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки

Table 3

Principal types of sources of water pollution by mercury in the large urbanized deltas of Asia and Africa

Река	Источники загрязнения			
	По удаленности от дельты		По специфике	
	Удаленные	Локальные	Специфичные для дельт	Специфичные для урбанизированных территорий
Меконг		+	+	
Нигер	+	+	+	+
Нил		+	+	+
Хонгха		+		+
Хуанхэ		+	+	+
Чжуцзян	+	+		+

Обсуждение

Проанализированная литература в целом удовлетворительно характеризует особенности загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки. Однако изучение аргументации, представленной авторами статей, делает эту характеристику менее четкой. Часто источники загрязнения только предполагаются. В ряде случаев не проведено четкого различия между наблюдаемой антропогенной деятельностью (потенциальная угроза) и повышенными концентрациями ртути (реализованная угроза). Это неоднозначный подход: например, исходя из общих знаний об атмосферном переносе ртути, можно предположить его значимость в конкретном случае, тогда как в действительности этот источник может играть совсем ограниченную роль [38]. Лишь для дельт рек Меконг и Чжуцзян можно обнаружить детальное прослеживание специалистами причинно-следственных связей (см. выше). Нередко анализ источников загрязнения носит не только пробабилистический, но и сугубо локальный характер. Специалисты пытаются обнаружить их на рассматриваемой территории, тогда как известна возможность их расположения на значительном удалении от дельт [36].

Отмеченные особенности выделения и отсутствия обоснования источников загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах азиатских и африканских дельт снижают качество соответствующей информации. Тем не менее она видится вполне достаточной для концептуализации рассматриваемой научной проблематики. Во-первых, подтверждается специфичность таких дельт, их самостоятельность как особых загрязняемых ртутью систем. Во-вторых, протекание процессов урбанизации вовсе не исключает (и, вероятно, не снижает) значимости несвязанных с ней источников загрязнения, как локальных, так и удаленных. В-третьих, достижение очень высоких концентраций ртути в водных объектах (табл. 2) вовсе необязательно связано с разнообразием источников загрязнения.

Заключение

Настоящая работа позволяет сделать три общих вывода. Во-первых, быстрая урбанизация крупных дельт в Азии и Африке сопровождается загрязнением воды ртутью, и в ряде случаев оно носит катастрофический характер. Во-вторых, источники загрязнения связаны со значительной антропогенной нагрузкой и специфичны для дельт и/или урбанизированных территорий. В-третьих, и количество, и качество информации о загрязнителях ограничены, а интерпретации причинно-следственных связей часто пробабилистичны. При этом последний вывод не снижает значимости двух предыдущих и не противоречит валидности выполненного исследо-

вания, т.к. последнее во многом и было направлено на определение качества ранее опубликованных сведений об источниках загрязнения воды ртутью в крупных дельтах Азии и Африки.

Методологическое значение настоящей работы двояко. Прежде всего, оно заключается в выявленной необходимости критического отношения к качеству информации о загрязнителях из международных публикаций при реализации новых исследовательских проектов. Кроме того, сделанные выводы позволяют указать на необходимость проведения специальных исследований, нацеленных именно на прослеживание причинно-следственных связей между антропогенной деятельностью, потенциально оказывающей влияние на речные дельты, и реально происходящим повышением концентраций конкретных тяжелых металлов.

Практическая значимость сделанных выводов определяется систематизацией информации о возможных источниках загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах, что важно для обеспечения их устойчивости и рационализации природопользования. Кроме того, представленная информация может способствовать лучшему пониманию важного аспекта геоэкологической проблематики в современном развитии ряда стран Азии и Африки, которые стоит учитывать при развитии сотрудничества с ними.

Перспективы последующих исследований связаны, с одной стороны, с расширением географии подобного рода исследований, а, с другой, – с сопоставлением международного и отечественного опыта для выработки лучших практик природопользования и минимизации негативного антропогенного воздействия при активном освоении дельтовых пространств. Кроме того, требуется совершенствование алгоритмов извлечения и критической оценки конкретной геоэкологической информации из научной литературы, что может стать предметом самостоятельных исследований.

### Литература

1. Haq BU, Milliman JD Perilous Future for River Deltas. *GSA Today*. 2023;33:4-12.
2. McGranahan G, Balk D, Colenbrander S, Engin H, MacManus K Is rapid urbanization of low-elevation deltas undermining adaptation to climate change? A global review. *Environment and Urbanization*. 2023;35:527-559.
3. Hong TTK, Giao NT Analysis of Surface Water Quality in Upstream Province of Vietnamese Mekong Delta Using Multivariate Statistics. *Water*. 2022;14:1975.
4. Chen Y, Zhou K, Xu Y How environmental stress will be spatially reconfigured under artificial sources and scale mismatch? A case in Yangtze River Delta, China. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025;12:503.
5. Basu M Impact of Mercury and Its Toxicity on Health and Environment: A General Perspective. *Environmental Science and Engineering*. 2023;F1792:95-139.
6. Kayani KF, Mohammed SJ Mercury in aquatic environments: toxicity and advances in remediation using covalent organic frameworks. *Materials Advances*. 2025;6:3371-3385.
7. Kumar V, Umesh M, Shanmugam MK, Chakraborty P, Duhan L, Gummadi SN, Pasrija R, Jayaraj I, Dasarahally Huligowda LK A Retrospection on Mercury Contamination, Bioaccumulation, and Toxicity in Diverse Environments: Current Insights and Future Prospects. *Sustainability*. 2023;15:13292.
8. Cojoc L, de Castro-Català N, de Guzmán I, González J, Arroita M, Besolí-Mestres N, Cadena I, Freixa A, Gutiérrez O, Larrañaga A, Muñoz I, Elozegi A, Petrovic M, Sabater S Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. *Chemosphere*. 2024;369:143806.
9. Allen A, Dietrich M, McLeod CL, Gillis M, Gokey K, Mbindi MF, Krekeler MPS Investigating mercury in road sediment in Michigan City, Indiana: A new type of environmental pollution record. *Environmental Advances*. 2024;15:100483.
10. Lin H, Zhu X, Feng Q, Guo J, Sun X, Liang Y Pollution, sources, and bonding mechanism of mercury in street dust of a subtropical city, southern China. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2019;25:393-409.
11. Wip D, Warneke T, Petersen AK, Notholt J, Temme C, Kock H, Cord P Urban mercury pollution in the City of Paramaribo, Suriname. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2013;6:205-213.



12. Javan K, Darestani M, Ibrar I, Pignatta G Interrelated issues within the Water-Energy-Food nexus with a focus on environmental pollution for sustainable development: A review. *Environmental Pollution*. 2025;368:125706.
13. Silva MC, do Nascimento Monte C, de Souza JR, Selfe ACC, Ishihara JH Mapping of metals contamination in coastal sediments around the world in the last decades: A bibliometric analysis and systematic review. *Marine Pollution Bulletin*. 2024;205:116572.
14. Yuniarti E, Exposto LASM, Dewata I, Nugraha FAD, Alfritri Health and Environmental Pollution: A Literature Review. *Kesmas Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*. 2024;19:38-45.
15. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boultron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hrobjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch WA, Whiting P, Moher D The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71.
16. Seleznev DG, Dinh CN, Hai TB, Karpova EP, Chi DTK, Kosolapov DB, Kosolapova NG, Malin MI, Malina IP, Man LQ, Prokin AA, Prusova IY, Sharov AN, Statkevich SV, Tsvetkov AI, Udodenko YG, Zakonov VV, Zhdanova SM, Krylov AV, Tiunov AV Biodiversity of aquatic organisms in the Mekong Delta, Vietnam. *Biodiversity Data Journal*. 2023;11:e105314.
17. Smigaj M, Hackney CR, Diem PK, Tri VPD, Ngoc NT, Bui DD, Darby SE, Leyland J Monitoring riverine traffic from space: The untapped potential of remote sensing for measuring human footprint on inland waterways. *Science of the Total Environment*. 2023;860:160363.
18. Gbadamosi F, Aldstadt J The interplay of oil exploitation, environmental degradation and health in the Niger Delta: A scoping review. *Tropical Medicine and International Health*. 2025;30:351-367.
19. Zabbey N, Sam K, Onyebuchi AT Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, Nigeria: Prospects and challenges. *Science of the Total Environment*. 2017;586:952-965.
20. Abdel-Raheem KHM, Khalil MM, Abdelhady AA, Tan L Anthropogenic-induced environmental and ecological changes in the Nile Delta over the past half-century. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171941.
21. Dang TD, Tran TA Rural Industrialization and Environmental Governance Challenges in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Environment and Development*. 2020;29:420-448.
22. He D, Chu J, Yang H Environmental changes in Yellow River delta with terrace construction and agricultural cropping. *PeerJ*. 2021;9:e12469.
23. Huo Y, Yang M, Lei M, Wu P, Tian X, Yang T, Wang Z, Mao Y Advancements in water and ecological risk assessment in the Yellow River Delta, North China: Implications for legal frameworks in environmental protection and public health. *Water and Environment Journal*. 2024;38:162-168.
24. Wang F, Hao RJ Environmental Pollution in Pearl River Delta, China: Status and Potential Effects. *Journal of Environmental Informatics Letters*. 2020;3:110-123.
25. Anyanwu IN, Beggel S, Sikoki FD, Okuku EO, Unyimadu JP, Geist JP Pollution of the Niger Delta with total petroleum hydrocarbons, heavy metals and nutrients in relation to seasonal dynamics. *Scientific Reports*. 2023;13:14079.
26. Ramadan FS, Nour HE, Aita SK, Zahran HR Evaluation of heavy metals accumulation risks in water of the Qalubiya drain in East Delta, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1750.
27. Shaalan WA Hazardous effects of heavy metal pollution on Nile tilapia in the aquatic ecosystem of the Eastern Delta in Egypt. *BMC Veterinary Research*. 2024;20:585.
28. Graves SD, Kidd KA, Batchelar KL, Cowie AM, O'Driscoll NJ, Martyniuk CJ Response of Oxidative Stress Transcripts in the Brain of Wild Yellow Perch (*Perca flavescens*) Exposed to an Environmental Gradient of Methylmercury. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 2017;192:50-58.
29. Soto Cárdenas CS, Fernandez Z, Arcagni M, Rizzo A, Diéguez MC Mercury Patterns in Lakes within a Natural Hotspot in the Southern Volcanic Zone of the Andes (Nahuel Huapi National Park, Patagonia, South America). *Environmental Chemistry*. 2025;22:EN24088.
30. Doan VT, Le CC, Le HVT, Trieu NA, Vo P, Tran D, Nguyen HV, Tabata T, Vu TTH Comprehensive Statistical Analysis for Characterizing Water Quality Assessment in the Mekong Delta: Trends, Variability, and Key Influencing Factors. *Sustainability*. 2025;17:5375.
31. Udiba UU, Odey MO, Ama J, Ayim EV, Akpan ER, Antai EE, Ebari SE, Ogbin IM Partition Coefficients and Metals Quality Index of Calabar and Great Kwa Rivers, Niger Delta, Nigeria. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2025;29:511-530.

32. Shetaia SA, Abu Khatita AM, Abdelhafez NA, Shaker IMA, El-Kafrawy SB Evaluation of potential health risk, heavy metal pollution indices and water quality of Edku lagoon – Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2020;24:265-290.
33. Nguyen NTT, Volkova IV Assessment of heavy metal pollution in water and sediments in the Red River delta (Vietnam). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012203.
34. Nguyen NTT, Volkova IV, Egorova VI Distribution of Mercury in Water and Bottom Sediments of the Estuary Area of the Red River (Vietnam). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;224:012047.
35. Wang K, Liu N, Xia J, Chu X, Xu X, Zhang T, Hu G, Liu Y, Zhang H, Xu Y Características hidroquímicas y ambiente acuático de las aguas superficiales y subterráneas poco profundas en el norte del delta del río Amarillo, China. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2023;14:89-133.
36. Zhen G, Li Y, Tong Y, Yang L, Zhu Y, Zhang W Temporal variation and regional transfer of heavy metals in the Pearl (Zhujiang) River, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:8410-8420.
37. Liu J, Li X, Chang X, Fu Q, Tu X, Zhu Y, Wang E, Bai Y Distributional Characteristics and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Centralized Surface Drinking Water Sources in Guangdong Province, China. *Research of Environmental Sciences*. 2025;38:282-293.
38. Huang M, Deng S, Dong H, Dai W, Pang J, Wang X Impacts of Atmospheric Mercury Deposition on Human Multimedia Exposure: Projection from Observations in the Pearl River Delta Region, South China. *Environmental Science and Technology*. 2016;50:10625-10634.
39. Lan NTP, Van Kien N Back to Nature-Based Agriculture: Green Livelihoods Are Taking Root in the Mekong River Delta. *Journal of People Plants and Environment*. 2021;24:551-561.
40. Day JW, Clark HC, Chang C, Hunter R, Norman CR Life cycle of oil and gas fields in the mississippi river delta: A review. *Water*. 2020;12:1492.
41. Deng Y, Yang Y, Yang T Three systems of the oil and gas formation in the world. *Petroleum Research*. 2025;10:1-27.
42. Thomas D Niger delta oil production, reserves, field sizes assessed. *Oil Gas Journal*. 1995;393:101-104.

## References

1. Haq B.U., Milliman J.D. Perilous Future for River Deltas. *GSA Today*. 2023;33:4–12.
2. McGranahan G., Balk D., Colenbrander S., et al. Is rapid urbanization of low-elevation deltas undermining adaptation to climate change? A global review. *Environment and Urbanization*. 2023;35:527–559.
3. Hong T.T.K., Giao N.T. Analysis of surface water quality in upstream province of Vietnamese Mekong Delta using multivariate statistics. *Water*. 2022;14:1975.
4. Chen Y., Zhou K., Xu Y. How environmental stress will be spatially reconfigured under artificial sources and scale mismatch? A case in Yangtze River Delta, China. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025;12:503.
5. Basu M. Impact of Mercury and Its Toxicity on Health and Environment: A General Perspective. *Environmental Science and Engineering*. 2023;F1792:95–139.
6. Kayani K.F., Mohammed S.J. Mercury in aquatic environments: toxicity and advances in remediation using covalent organic frameworks. *Materials Advances*. 2025;6:3371–3385.
7. Kumar V., Umesh M., Shanmugam M.K., et al. A retrospection on mercury contamination, bioaccumulation, and toxicity in diverse environments: Current insights and future prospects. *Sustainability*. 2023;15:13292.
8. Cojoc L., de Castro-Català N., de Guzmán I., et al. Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. *Chemosphere*. 2024;369:143806.
9. Allen A., Dietrich M., McLeod C.L., et al. Investigating mercury in road sediment in Michigan City, Indiana: A new type of environmental pollution record. *Environmental Advances*. 2024;15:100483.
10. Lin H., Zhu X., Feng Q., et al. Pollution, sources, and bonding mechanism of mercury in street dust of a subtropical city, southern China. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2019;25:393–409.
11. Wip D., Warneke T., Petersen A.K., et al. Urban mercury pollution in the City of Paramaribo, Suriname. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2013;6:205–213.
12. Javan K., Darestani M., Ibrar I., Pignatta G. Interrelated issues within the Water-Energy-Food nexus with a focus on environmental pollution for sustainable development: A review. *Environmental Pollution*. 2025;368:125706.

13. Silva M.C., do Nascimento Monte C., de Souza J.R., et al. Mapping of metals contamination in coastal sediments around the world in the last decades: A bibliometric analysis and systematic review. *Marine Pollution Bulletin*. 2024;205:116572.
14. Yuniarti E., Exposto L.A.S.M., Dewata I., et al. Health and Environmental Pollution: A Literature Review. *Kesmas Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*. 2024;19:38–45.
15. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71.
16. Seleznev D.G., Dinh C.N., Hai T.B., et al. Biodiversity of aquatic organisms in the Mekong Delta, Vietnam. *Biodiversity Data Journal*. 2023;11:e105314.
17. Smigaj M., Hackney C.R., Diem P.K., et al. Monitoring riverine traffic from space: The untapped potential of remote sensing for measuring human footprint on inland waterways. *Science of the Total Environment*. 2023;860:160363.
18. Gbadamosi F., Aldstadt J. The interplay of oil exploitation, environmental degradation and health in the Niger Delta: A scoping review. *Tropical Medicine and International Health*. 2025;30:351–367.
19. Zabbey N., Sam K., Onyebuchi A.T. Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, Nigeria: Prospects and challenges. *Science of the Total Environment*. 2017;586:952–965.
20. Abdel-Raheem K.H.M., Khalil M.M., Abdelhady A.A., Tan L. Anthropogenic-induced environmental and ecological changes in the Nile Delta over the past half-century. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171941.
21. Dang T.D., Tran T.A. Rural Industrialization and Environmental Governance Challenges in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Environment and Development*. 2020;29:420–448.
22. He D., Chu J., Yang H. Environmental changes in Yellow River delta with terrace construction and agricultural cropping. *PeerJ*. 2021;9:e12469.
23. Huo Y., Yang M., Lei M., et al. Advancements in water and ecological risk assessment in the Yellow River Delta, North China: Implications for legal frameworks in environmental protection and public health. *Water and Environment Journal*. 2024;38:162–168.
24. Wang F., Hao R.J. Environmental Pollution in Pearl River Delta, China: Status and Potential Effects. *Journal of Environmental Informatics Letters*. 2020;3:110–123.
25. Anyanwu I.N., Beggel S., Sikoki F.D., et al. Pollution of the Niger Delta with total petroleum hydrocarbons, heavy metals and nutrients in relation to seasonal dynamics. *Scientific Reports*. 2023;13:14079.
26. Ramadan F.S., Nour H.E., Aita S.K., Zahran H.R. Evaluation of heavy metals accumulation risks in water of the Qalubiya drain in East Delta, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1750.
27. Shaalan W.A. Hazardous effects of heavy metal pollution on Nile tilapia in the aquatic ecosystem of the Eastern Delta in Egypt. *BMC Veterinary Research*. 2024;20:585.
28. Graves S.D., Kidd K.A., Batchelar K.L., et al. Response of oxidative stress transcripts in the brain of wild yellow perch (*Perca flavescens*) exposed to an environmental gradient of methylmercury. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 2017;192:50–58.
29. Soto Cárdenas C.S., Fernandez Z., Arcagni M., et al. Mercury patterns in lakes within a natural hotspot in the southern volcanic zone of the Andes (Nahuel Huapi National Park, Patagonia, South America). *Environmental Chemistry*. 2025;22:EN24088.
30. Doan V.T., Le C.C., Le H.V.T., et al. Comprehensive statistical analysis for characterizing water quality assessment in the Mekong Delta: Trends, variability, and key influencing factors. *Sustainability*. 2025;17:5375.
31. Udiba U.U., Odey M.O., Ama J., et al. Partition coefficients and metals quality index of Calabar and Great Kwa Rivers, Niger Delta, Nigeria. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2025;29:511–530.
32. Shetaia S.A., Abu Khatita A.M., Abdelhafez N.A., et al. Evaluation of potential health risk, heavy metal pollution indices and water quality of Edku lagoon – Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2020;24:265–290.
33. Nguyen N.T.T., Volkova I.V. Assessment of heavy metal pollution in water and sediments in the Red River delta (Vietnam). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012203.
34. Nguyen N.T.T., Volkova I.V., Egorova V.I. Distribution of mercury in water and bottom sediments of the estuary area of the Red River (Vietnam). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;224:012047.
35. Wang K., Liu N., Xia J., et al. Características hidroquímicas y ambiente acuático de las aguas superficiales y subterráneas poco profundas en el norte del delta del río Amarillo, China. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2023;14:89–133.

36. Zhen G., Li Y., Tong Y., et al. Temporal variation and regional transfer of heavy metals in the Pearl (Zhujiang) River, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:8410–8420.
37. Liu J., Li X., Chang X., et al. Distributional characteristics and probabilistic health risk assessment of heavy metal pollution in centralized surface drinking water sources in Guangdong Province, China. *Research of Environmental Sciences*. 2025;38:282–293.
38. Huang M., Deng S., Dong H., et al. Impacts of atmospheric mercury deposition on human multimedia exposure: Projection from observations in the Pearl River Delta region, South China. *Environmental Science and Technology*. 2016;50:10625–10634.
39. Lan N.T.P., Van Kien N. Back to nature-based agriculture: Green livelihoods are taking root in the Mekong River Delta. *Journal of People Plants and Environment*. 2021;24:551–561.
40. Day J.W., Clark H.C., Chang C., et al. Life cycle of oil and gas fields in the Mississippi River Delta: A review. *Water*. 2020;12:1492.
41. Deng Y., Yang Y., Yang T. Three systems of the oil and gas formation in the world. *Petroleum Research*. 2025;10:1–27.
42. Thomas D. Niger delta oil production, reserves, field sizes assessed. *Oil Gas Journal*. 1995;393:101–104.

### Об авторах

**МИХАЙЛЕНКО Анна Владимировна** – к.г.н., доцент Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-1156-770X, Researcher ID: A-8847-2017, Scopus Author ID: 55971159100, SPIN: 2036-3311

E-mail: avmihaylenko@sfedu.ru

**РУБАН Дмитрий Александрович** – Ph.D., к.г.-м.н., доцент, доцент Института туризма, сервиса и креативных индустрий Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2847-645X, Researcher ID: W-7434-2019, Scopus Author ID: 8520926600, SPIN: 5671-0800

E-mail: ruban-d@mail.ru

### About the authors

**Anna V. MIKHAILENKO** – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-1156-770X, Researcher ID: A-8847-2017, Scopus Author ID: 55971159100, SPIN: 2036-3311

E-mail: avmihaylenko@sfedu.ru

**Dmitry A. RUBAN** – Ph.D. (Geology), Cand. Sci. (Geology-Mineralogy), Docent, Associate Professor, Institute of Tourism, Service and Creative Industries, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2847-645X, Researcher ID: W-7434-2019, Scopus Author ID: 8520926600, SPIN: 5671-0800

E-mail: ruban-d@mail.ru

### Вклад авторов

**Михайленко А. В.** – проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, руководство исследованием

**Рубан Д. А.** – разработка концепции, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи

### Authors' contribution

**Anna V. Mikhailenko** – investigation, writing – original draft, writing – review & editing, supervision

**Dmitry A. Ruban** – conceptualization, validation, investigation, writing – original draft

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests**

The authors declare no relevant conflict of interests

*Поступила в редакцию / Submitted 05.10.2025*

*Поступила после рецензирования / Revised 25.11.2025*

*Принята к публикации / Accepted 24.12.2025*