

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.054

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ РТУТИ В РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА

© 2022 г. О. С. Решетняк^{1,2,*}

¹ ФГБУ “Гидрохимический институт” Росгидромета, пр. Стачки, 198, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

² Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, ул. Зорге, 40, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*E-mail: olgare1@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2022 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

В статье рассмотрены проблема глобального загрязнения ртутью окружающей среды, источники поступления, формы нахождения и особенности миграции ртути в поверхностных водах. Ртуть и ее соединения входят в список приоритетных загрязняющих биосферу веществ. За счет глобальных миграционных процессов соединения ртути обнаруживаются в определенных количествах практически во всех средах и в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах различных регионов России и во многих странах мира. Представлены данные о содержании ртути в речных водах различных регионов России по данным литературных источников и данным регулярного мониторинга Росгидромета. Выявлена высокая неоднородность содержания соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России. Значения концентраций колеблются от значений ниже предела обнаружения метода до значений, превышающих ПДК в десятки и сотни раз, что соответствует экстремально высокому уровню загрязнения воды. Самые аномально высокие концентрации отмечены в единичных случаях (реки Амбарная, Норилка, Чумыш, Сусуя и Лютога). Несмотря на это, медианные значения концентраций ртути в воде рек в большинстве случаев находятся на уровне ниже предела обнаружения метода.

Ключевые слова: соединения ртути, речные экосистемы, природные зоны, фоновый уровень, кратность превышения ПДК, экстремально высокий уровень загрязнения воды

DOI: 10.31857/S0869780922020060

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения окружающей среды ртутью общемировая. По результатам проведенной оценки (Global Mercury Assessment, 2013)¹ показано, “что объемы выбросов этого токсичного металла, связанных с кустарной добычей полезных ископаемых, удвоились по сравнению с 2005 годом...”. В исследованиях ЮНЕП впервые сделана оценка выбросов ртути в реки и озера. За последние 100 лет антропогенные выбросы привели к удвоению содержания ртути в верхнем 100-метровом слое океанов мира. Концентрации в более глубоких водах повысились на величины до 25%. Большая часть воздействия ртути на человека происходит при употреблении загрязненной рыбы, что делает экологию водной среды критически важным звеном для сохранения здоровья человека.

В окружающей среде ртуть и ее соединения распространены повсеместно. Среднее содержание ее в земной коре по данным различных источников от 4.5 до $8.3 \times 10^{-6}\%$ по массе [16, 17], в донных отложениях $4.0 \times 10^{-6}\%$ и золе растений $25.0 \times 10^{-6}\%$ по массе соответственно [4]. Ртуть входит в состав живых организмов, содержится в каменных углях, в золе углеводородов, которые сжигаются в огромных количествах, а также в атмосфере, куда она поступает как природным путем (при извержении вулканов, дегазации Земли), так и в результате хозяйственной деятельности человека (химические технологии, металлургия, медицина, приборостроение, электропромышленность, сельское хозяйство, горное дело и т.д.) [16, 17].

В природные воды соединения ртути могут попадать с атмосферными выпадениями. “Время жизни” ртути в атмосфере примерно 10 суток и из 1 м^3 дождевой воды на Землю выпадает 200 мкг ртути, за год это составляет более 100 тыс. т., что в

¹ Official site of UNEP – United Nations Environment Program: www.unep.org

15–20 раз больше количества данного металла, добываемого человечеством. Из водной среды растворимые формы ртути выводятся в донные отложения, накапливаясь в глинистых илах с периодом полного удаления $n \cdot 10^4$ лет. Также ртуть прочно связывается в почвах с гуминовыми кислотами — период полувыведения составляет 250 лет [4].

Учитывая высокую токсичность ртути (особенно органической формы — метилртути), высокую сорбционную способность на взвешенных частицах, способность к биоаккумуляции по пищевой цепи, присутствие в определенных количествах практически во всех средах и в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах [8, 9], соединения ртути включены в список приоритетных загрязняющих веществ, обязательных к определению в компонентах окружающей среды во многих странах мира.

При этом важно отметить, что ртуть обладает высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях. Особенно сильное негативное влияние на водные экосистемы оказывают соединения ртути, поступающие в водную среду из антропогенных источников. Это находит отражение в увеличении их содержания в водной среде, донных отложениях и биоте, что приводит к снижению продуктивности водных экосистем и потенциальной опасности и риску для здоровья человека [8, 27]. Эти обстоятельства и обуславливают актуальность исследований содержания соединений ртути в природных водах.

Работ, посвященных изучению распределения, трансформации и накоплению соединений ртути в природных водах достаточно много, но в большинстве из них рассматриваются озера и водохранилища. Существует даже “ртутная проблема”, которая в той или иной степени возникает практически в любом создаваемом искусственном водоеме. При этом экологическая опасность связана не с возможной угрозой повышения фонового содержания ртути в водной среде, а с трансформацией неорганической ртути в монометилртуть. Отмечается, что повышенное содержание ртути в рыбе типично для недавно созданных водохранилищ [19].

Гораздо меньше публикаций по содержанию и распределению ртути в речных водах. Это связано, с одной стороны, с динамичностью и непостоянством химического состава речных вод, а с другой — с трудностями корректного и надежного определения малых концентраций растворенных форм ртути в воде [13, 24, 25].

Изучение особенностей миграции ртути особенно важно в местах расположения ртутных месторождений. Так, например, выполненные в 1990-х гг. исследования распределения соединений ртути в природных средах в бассейне р. Катунь позволили выявить геохимические особен-

ности миграции соединений ртути и в изменении ее содержания в речных водах [1, 3, 11]. Данные исследования проведены комплексно с учетом гидрологических условий в бассейне, аккумуляции ртути в донных отложениях и возможности ее метилирования. Выявлена локализация ртутного загрязнения на отдельных участках бассейна, приуроченных к местам влияния ртутных месторождений [1].

В работе [3] рассмотрено содержание ртути в почве, воде, взвешенном веществе, донных отложениях и гидробионтах в водных объектах бассейна реки Катунь. Наличие повышенных концентраций ртути в воде приводит не только к ее аккумуляции в донных осадках, но и к осаждению на взвеси органического происхождения, взаимодействию с микроорганизмами, кумуляции фито-, зоопланктоном и далее по трофической пищевой цепи. Показано, что, несмотря на обогащение ртутью коренных пород региона, идентифицировать биогеохимическую кумуляцию этого элемента практически не удалось. Также был сделан вывод о низкой биодоступности соединений ртути, содержащихся в породах, почвах и воде.

Общая закономерность в сезонном распределении соединений ртути в воде заключается в минимальном содержании растворенной ртути в осенне-зимний период, в паводковые периоды повышается содержание растворенной ртути и уменьшается ее концентрация во взвешенном веществе. Установлена достаточно хорошая корреляция содержания ртути в воде с концентрацией растворенного органического вещества [1].

При изучении изменений концентрации ртути в водной среде авторами работы [11] показано, что концентрации соединений ртути в пробах, отобранных через равные интервалы за сравнительно короткий промежуток времени, могут различаться более чем в 10 раз, что подтверждает высказывание о пространственной неоднородности содержания ртути в воде и происходящей ее трансформации.

Существует реальная опасность вторичного загрязнения поверхностных вод соединениями ртути в старых золотодобывающих районах, где ранее при добыче золота проводили его извлечение способом амальгамации. Несмотря на запрет применения ртути для этих целей, проблема ртутного загрязнения компонентов окружающей среды таких территорий остается [5], что еще раз подтверждает неослабевающий интерес к изучению миграции ртути в различных средах (водная среда, донные отложения, почвы и др.).

Важным аспектом в исследованиях распределения ртути в водных экосистемах является изучение ее миграции по руслу реки [11–13] и содержания в устьевых экосистемах [6, 20, 21, 23]. При изучении сезонной динамики переноса ртути в

р. Катунь Т.С. Папиной с соавторами, показано, что максимальный сток ртути приходится на весенний паводок и связан преимущественно с транспортом взвешенного вещества (67–88%) [11, 12]. Аналогично и для южных рек около 70–80% соединений ртути переносится взвешенным веществом, количество и качество которого зависит от гидрологического режима и времени года. Наибольшее содержание соединений ртути в воде приходится на холодное время года [6].

Особенности распределения, миграции и трансформации ртути в водах устьевой области р. Северная Двина рассмотрены в работах [20, 21]. Показана четкая взаимосвязь концентрации ртути в воде с физико-химическими параметрами воды (температура, pH, Eh, содержание кислорода и соленость), и выявлено, что в отличие от рек юга России в реках Севера ЕТР ртуть мигрирует преимущественно в растворенной форме (в виде фульватных комплексов).

В ряде работ рассмотрено содержание, накопление, распределение и миграция соединений ртути в природных водах отдельных рек Дальнего Востока [2, 22–24]. Авторами работы [24] установлено, что концентрации растворенных форм ртути в реках Приморья соответствуют уровню незагрязненных рек мира (0.5–2.9 нг/дм³). При этом концентрация ртути в речной взвеси колеблется от 0.05–0.06 мкг/г в малозагрязненных и крупных реках до 0.24–0.71 мкг/г в реках с интенсивной антропогенной нагрузкой. Таким образом, авторами делается вывод о возможности использования в качестве индикатора антропогенного загрязнения данных о концентрации ртути на речной взвеси.

Содержание ртути в органах и тканях рыб широко используется в качестве индикатора уровня загрязнения вод. Даже очень низкие концентрации ртути в рыбе считаются потенциально опасными для человека [7], особенно если происходит увеличение скорости накопления ртути в налеме обитающем в бассейне р. Маккензи (Канада) [26].

Ряд авторов отмечают, что в условиях климатических изменений и таяния многолетней мерзлоты существует вероятность ртутного загрязнения арктических экосистем и увеличения выноса соединений ртути в Северный ледовитый океан [28, 29].

Из всего вышесказанного становится очевидным актуальность исследований по изучению уровней содержания ртути, форм нахождения и закономерностей миграции в объектах окружающей среды.

Цель данного исследования заключалась в обобщении многолетней информации о содержании соединений ртути в речных экосистемах разных природных зон и высотных поясов России и выявлении особенностей многолетней изменчивости концентраций соединений ртути в речных

водах. Присутствие ртути и ее соединений в речных экосистемах не только снижает качество воды, но и ухудшает состояние водных экосистем и нарушает функционирование гидробионтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки изменчивости содержания соединений ртути в водной среде речных экосистем использована многолетняя (1990–2014 гг.) режимная гидрохимическая информация Государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета². Объекты исследования — речные экосистемы различных природных зон и высотных поясов России, воды которых имеют весьма сложный многокомпонентный химический состав, изменяющийся во времени и пространстве. Для изучения содержания и распределения соединений ртути в поверхностных водах суши выбраны более сорока речных экосистем (участков рек), функционирующих в различных природно-климатических условиях.

Выбор речных экосистем проводили из большого перечня водных объектов, включенных в ГНС. В перечень исследуемых объектов вошли реки или их участки, в водной среде которых определяется концентрация соединений ртути. Таким образом, в работе использована информация о химическом составе воды в 44 пунктах наблюдений на 39 реках, в том числе в 4 пунктах наблюдений на 4 реках в зонах тундры и лесотундры, 12 пунктах наблюдений на 12 реках в зоне тайги, 2 пунктах наблюдений на 2 реках в зоне смешанных и широколиственных лесов, 15 пунктах наблюдений на 14 реках в зоне лесостепей и 5 пунктах наблюдений на 3 реках в зонах степей, полупустынь и пустынь, также 6 пунктах наблюдений на 4 реках, расположенных в различных высотных поясах России.

Многолетняя изменчивость содержания соединений ртути показана по таким характеристикам, как диапазон колебания концентрации (минимальное и максимальное значение), медианное значение концентрации и частота превышения ПДК за исследуемый многолетний период.

Уровень загрязнения речных вод соединениями ртути оценивали по кратности превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения³ (0.01 мкг/дм³ или 10 нг/дм³) и по критериям высокого (ВЗ) и экстремально высокого

² Ежегодники и обзоры. Сайт Гидрохимического института: URL: <https://gidrohim.com/> (дата обращения: 01.10.2021).

³ Приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года N 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (с изменениями на 10 марта 2020 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120>

уровня загрязнения (ЭВЗ) воды⁴. При возникновении случаев ВЗ и ЭВЗ воды учитывается класс опасности веществ. Критерии определения высокого и экстремально высокого уровней загрязненности водных объектов по содержанию соединений ртути (1-го класса опасности) соответствуют диапазону концентраций (0.03–0.05) мкг/дм³ при ВЗ (3–5 ПДК) и ≥ 0.05 мкг/дм³ при ЭВЗ воды (более 5 ПДК).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по содержанию ртути в природных водах (фоновые уровни, концентрации в незагрязненных водных объектах и т.п.) значительно варьируют по данным разных исследований. Связано это не столько с различием методов определения ртути, сколько (в большей степени) с зональными геохимическими особенностями ландшафтов, разной геохимической обстановкой в различных природных зонах. По данным Дж. Мур, С. Рамамурти [8], концентрации растворенной ртути в незагрязненных пресных водах находятся на уровне 0.02–0.10 мкг/дм³ (20–100 нг/дм³), что значительно выше значений, представленных в докладе международной группы специалистов ООН и ВОЗ (фоновые уровни ртути для водных систем (воды рек и озер) составляют 1–3 нг/дм³ (0.001–0.003 мкг/дм³)) [18]. При этом отмечается, что могут наблюдаться значительные локальные отклонения от этих величин, особенно в прибрежных морских водах, в водах различных рек и озер, где общее содержание ртути значительно зависит от содержания взвешенного вещества.

Для поверхностных вод на территории России фоновые концентрации ртути также значительно варьируют от значений 0.02–0.40 мкг/дм³ в 1980-х гг. до 0.13–1.76 мкг/дм³ в поверхностных водах большинства фоновых районов в 2020 г. по данным сети комплексного фонового мониторинга⁵, что значительно выше норматива ПДК_{р/х} (0.01 мкг/дм³ или 10 нг/дм³).

Изменчивость концентраций соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России за многолетний период представлена в табл. 1 (по данным регулярного

мониторинга). Диапазон концентраций соединений ртути в воде речных экосистем существенно варьирует от значений ниже определяемого уровня до 16.8 мкг/дм³ в зонах тундры и лесотундры, 1.62 мкг/дм³ – зоне тайги, 0.184 мкг/дм³ – зоне смешанных и широколиственных лесов, 3.15 мкг/дм³ – зоне лесостепей, 0.40 мкг/дм³ – зонах степей, полупустынь и пустынь.

В воде исследуемых водных объектов таежного и тундрово-таежного высотных поясов наблюдения за содержанием соединений ртути не проводились. В таежно-, тундрово-таежном и горно-таежном высотных поясах Дальневосточного региона отмечены высокие максимальные значения концентраций ртути в воде рек Сусуя (г. Южно-Сахалинск), Лютога (г. Анива) и Алей (г. Алейск), достигающие значений 1.50–5.16 мкг/дм³. Практически для всех исследуемых рек или их участков значения медианы вариационных рядов концентраций соединений ртути ниже предела обнаружения (н.о.) или ниже ПДК (см. табл. 1).

Вместе с тем, количество проб (в %), в которых концентрация ртути превышала ПДК, значительно варьирует в зависимости от широтной зональности. В зонах тундры и лесотундры этот показатель меняется от 7.8% (р. Амбарная) до 53.8% (р. Печенга), зоне тайги – от отсутствия превышения (рр. Тара, Кия и Колыма) до 54–75% (реки Нюдуай, Белая, Нева и Ижора), и зоне лесостепей – от отсутствия превышения до 31–38% (реки Обь, Барнаулка, Чумыш). Практически во всех пробах воды в устьевой части р. Волга соединения ртути присутствовали в концентрациях, превышающих ПДК, и доля этих проб составляла свыше 85%. В речных экосистемах различных высотных поясов частота превышения ПДК по содержанию в воде соединений ртути не высока и составляет в среднем порядка 7–16% (за исключением р. Алей – 34.1%).

В табл. 2 представлена зональная изменчивость содержания соединений ртути в водной среде рек России за многолетний период (1990–2014 гг.). Реки или их участки сгруппированы по пределам изменения концентрации в кратности ПДК. Можно отметить высокую неоднородность в содержании соединений ртути в речных водах. Аномально высокие концентрации отмечены в единичных речных экосистемах в зонах тундры и лесотундры в реках Амбарная (до 1680 ПДК), Норилка (до 1260 ПДК); лесостепей в р. Чумыш (до 315 ПДК) и в таежном и горно-таежном высотных поясах в реках Сусуя (до 216 ПДК) и Лютога (до 516 ПДК). При этом существенно, что частота встречаемости высоких и аномально высоких концентраций соединений ртути в воде небольшая.

Оценить уровень загрязнения речных вод данным экотоксикантом можно с использованием

⁴ РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 55 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039667>

⁵ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 864. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/

Таблица 1. Содержание соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России за многолетний период 1990–2014 гг. (составлено автором)

Река – пункт наблюдений	N	Концентрация, мкг/дм ³		Частота превышения ПДК, %
		диапазон	медиана	
1	2	3	4	5
Зона тундры и лесотундры				
Печенга – п. Корзуново	39	н.о.*–0.09	0.01	53.8
Щучья – г. Норильск	33	н.о.–6.30	н.о.	12.1
Амбарная – устье	51	н.о.–16.8	н.о.	7.8
Норилка – устье	52	н.о.–12.6	н.о.	9.6
Зона тайги				
Роста – г. Мурманск	107	н.о.–0.27	н.о.	42.1
Нюдауй – г. Мончегорск	180	н.о.–0.50	0.014	54.4
Белая – г. Апатиты	119	н.о.–0.25	0.022	56.3
Нева – г. Санкт-Петербург	18	н.о.–1.05	0.195	75.0
Ижора – г. Санкт-Петербург	18	н.о.–0.90	0.300	75.0
Обь – с. Александровское	75	н.о.–0.06	н.о.	14.7
Тартас – с. Северное	45	н.о.–0.06	н.о.	31.1
Тара – с. Кыштовка	26	все н.о.	н.о.	0
Иня – с. Кумень	135	н.о.–0.06	н.о.	9.6
Кия – г. Мариинск	119	все н.о.	н.о.	0
Томь – г. Томск	85	н.о.–1.62	н.о.	34.1
Колыма – п. Усть-Среднекан	147	все н.о.	н.о.	0
Зона смешанных и широколиственных лесов				
Неман – г. Советск	53	н.о.–0.087	0.007	35.8
Преголя – г. Калининград	53	н.о.–0.184	0.011	52.8
Зона лесостепей				
Дон – г. Донской	47	все н.о.	н.о.	0
Красивая Меча – г. Ефремов	49	все н.о.	н.о.	0
Упа – г. Тула, ниже города	55	все н.о.	н.о.	0
Сок – с. Красный Яр	55	все н.о.	н.о.	0
Самара – г. Самара	260	н.о.–1.56	н.о.	3.8
Большой Кинель – пгт. Тимашево	33	н.о.–0.52	н.о.	3.0
Белая – г. Уфа	121	н.о.–0.70	н.о.	6.6
Инзер – д. Азово	80	все н.о.	н.о.	0
Быстрый Танып – д.Алтаево	79	все н.о.	н.о.	0
Обь – г. Барнаул	106	н.о.–1.50	н.о.	32.1
Обь – г. Новосибирск	105	н.о.–0.06	н.о.	12.4
Барнаулка – г. Барнаул	89	н.о.–1.50	н.о.	38.2
Омь – г. Куйбышев	106	н.о.–0.09	н.о.	17.0
Чумыш – г. Заринск	71	н.о.–3.15	н.о.	31.0
Каргат – с. Здвинск	38	н.о.–0.03	н.о.	13.2
Зона степей				
Чапаевка – г. Чапаевск	261	н.о.–0.32	н.о.	5.0
Омь – г. Омск	142	н.о.–0.09	н.о.	2.1

Таблица 1. Окончание

Река – пункт наблюдений	N	Концентрация, мкг/дм ³		Частота превышения ПДК, %
		диапазон	медиана	
1	2	3	4	5
Зона полупустынь и пустынь				
Волга – с. Цаган-Аман	14	н.о.–0.08	0.04	92.9
Волга – г. Астрахань, выше города	159	н.о.–0.40	0.04	87.4
Волга – г. Астрахань, ниже города	218	н.о.–0.08	0.04	85.3
Зона тайги и таежный, горно-таежный пояса				
Сусуя – г. Южно-Сахалинск	69	н.о.–2.16	н.о.	11.6
Лютога – г. Анива	68	н.о.–5.16	н.о.	16.2
Амур – г. Благовещенск	300	н.о.–0.06	н.о.	10.0
Амур – г. Хабаровск	121	н.о.–0.25	н.о.	7.4
Амур – г. Амурск	128	н.о.–0.22	н.о.	2.3
Алей – г. Алейск	82	н.о.–1.50	н.о.	34.1

Примечания: Серым цветом выделены случаи, когда медианные концентрации превышают ПДКр/х. N – количество проб (количество измерений); * н.о. – концентрация ниже предела обнаружения.

Таблица 2. Зональная изменчивость содержания соединений ртути в речных водах России за многолетний период (1990–2014 гг.)

Природная зона или высотный пояс	Обобщенные пределы изменения концентрации (в ПДК)	Реки или их участки
Зоны тундры и лесотундры	0–9.0	Печенга
	0–1680	Норилка, Амбарная, Щучья
Зона тайги	0–6.0	Обь, Тартас, Тара, Иня, Кия, Колыма
	0–50	Роста, Ньюдау, Белая
	0–105	Нева, Ижора, Томь
Зона смешанных и широколиственных лесов	0–18.4	Преголя, Неман
Зона лесостепей	0–9.0	Дон, Красивая Меча, Упа, Сок, Инзер, Быстрый Танып, Обь (г. Новосибирск), Каргат
	0–150	Самара, Большой Кинель, Белая, Обь (г. Барнаул), Барнаулка
	0–315	Чумыш
Зона степей, полупустынь и полупустынь	0–9.0	Омь, Волга (с. Цаган-Аман, ниже г. Астрахань)
	0–40	Чапаевка, Волга (выше г. Астрахань)
Таежный и тундрово-таежный пояс	0–25	Амур
	0–216	Алей, Сусуя
	0–516	Лютога

критериев ВЗ и ЭВЗ. По соединениям ртути можно отметить, что все максимальные значения концентраций (кроме н.о. – ниже предела обнаружения) соответствуют уровню ЭВЗ для рек всех природных зон и высотных поясов. Уровень высокого загрязнения воды соединениями ртути до-

стигался по медианным значениям в пунктах наблюдения на р. Волга.

При сравнении представленных в таблицах данных с типичными фоновыми уровнями ртути в природных водах превышения наблюдаются только по максимальным значениям concentra-

ций (значениям, имеющим низкую частоту встречаемости в рядах данных и не характерным для экосистем).

В тех случаях, когда имеет место высокая частота встречаемости высоких и аномально высоких концентраций особо опасных токсикантов (в том числе соединений ртути), обуславливающая возникновение случаев ВЗ и ЭВЗ воды, наблюдается ухудшение экологического состояния речных экосистем за счет усиления процессов экологического регресса сообществ водных организмов или гибель биоты за счет токсического эффекта [10]. При этом формируется экологический риск как вероятность ухудшения состояния водной экосистемы и перехода ее в неустойчивое состояние антропогенного экологического или метаболического регресса [14]. В современных условиях многофакторного антропогенного воздействия и нестационарных климатических изменений существует опасность “ртутного загрязнения” речных экосистем. И, несмотря на то, что уровень загрязненности речных вод соединениями ртути только эпизодически достигает экстремально высокого уровня загрязнения воды, необходимо уделять особое внимание изучению динамики содержания ртути в речных водах для предотвращения ухудшения качества воды и деградации водных биоценозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных и обобщение информации многолетних наблюдений за содержанием соединений ртути в воде рек России позволили заключить следующее.

1. Проблема ртутного загрязнения различных компонентов окружающей среды является глобальной и требует комплексного решения. Ртуть и ее соединения включены в международный список приоритетных загрязняющих веществ и являются обязательным показателем в программах мониторинга состояния природных вод во многих странах мира.

2. Соединения ртути обладают высокой сорбционной способностью и высокой биоаккумуляцией по пищевой цепи. Это обуславливает присутствие ртути в определенных количествах практически во всех средах и в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах.

3. Ртуть обладает высокой токсичностью (особенно в ее органической форме) для живых организмов в относительно низких концентрациях. Особенно сильное негативное влияние на водные экосистемы оказывают соединения ртути, поступающие из антропогенных источников. Происходит депонирование ртути в донных отложениях и биоте, что формирует определенный риск для здоровья человека.

4. Выявлена высокая неоднородность содержания соединений ртути в речных водах различных природных зон и высотных поясов России. Значения концентраций колеблются от значений ниже предела обнаружения метода до значений, превышающих ПДК в десятки и сотни раз. Такие высокие содержания ртути в воде соответствуют экстремально высокому уровню загрязнения речных экосистем. Самые аномально высокие концентрации отмечены в единичных случаях. Это характерно для речных экосистем в зонах тундры и лесотундры (реки Амбарная и Норилка), лесостепей (р. Чумыш) и таежного и горно-таежного высотных поясов (реки Сусуя и Лютога).

5. Получены новые данные о содержании одного из самых опасных экотоксикантов – ртути – в водной среде речных экосистем России, функционирующих в различных природно-климатических условиях. Уровень загрязненности речных вод соединениями ртути эпизодически достигает экстремально высокого уровня загрязнения воды, что негативно сказывается на биоценозах и экологическом состоянии экосистемы в целом. Необходимо уделять внимание дальнейшему изучению динамики содержания ртути в воде для своевременного реагирования на повышение ее концентраций особенно в условиях климатических изменений.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00144_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вижин В.В., Гоголев А.З., Сагдеев Р.З., Сапрыкин А.В., Фризен Л.Ф.* Изменение концентрации ртути в водах Катунь // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 1. С. 67–77.
2. *Галатова Е.А.* Накопление и распределение экотоксикантов в речной воде (на примере реки Уй) // Омский научный вестник. 2009. Т. 84. № 1. С. 19–21.
3. *Грошева Е.И.* Ртуть в природных объектах р. Катунь // География и природные ресурсы. 1992. № 2. С. 53–57.
4. *Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т.* Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 294 с.
5. *Замана Л.В.* Ртуть в поверхностных водах Балей-Тасеевского золотопромышленного узла // Записки Забайкальского отделения РГО. 2012. Вып. 131. С. 83–89.
6. *Козлова С.И., Кулебакина Л.Г., Зелукова Ю.В.* Содержание ртути в воде, взвешенном веществе и донных отложениях устьевой зоны реки Дунай // Водные ресурсы. 1985. Т. 12. № 1. С. 155–159.
7. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия. 2016. № 6. С. 495–504.

8. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 288 с.
9. Никаноров А.М., Жулидов А.В., Покаржевский А.Л. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 144 с.
10. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций: монография. Ростов-на-Дону: "НОК", 2012. 310 с.
11. Папина Т.С., Артемьева С.С., Темерев С.В. Особенности миграции ртути в бассейне Катуни // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 1. С. 60–66.
12. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода — взвешенное вещество — донные отложения речных экосистем. Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН. Новосибирск, 2001. 58 с.
13. Папина Т.С. Эколого-аналитическое исследование распределения тяжелых металлов в водных экосистемах бассейна р. Обь: дис. ... док. хим. наук. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2004. 259 с.
14. Решетняк О.С. Оценка эффекта антропогенного воздействия и экологического риска в экосистеме Нижней Волги // Тр. Института биологии внутренних вод. 2018. Вып. 83 (86). С. 23–31.
15. Ровинский Ф.Я., Бурцева Л.В., Петрухин В.А., Черханов Ю.П., Чичева Т.Б. Фоновое содержание свинца, ртути, мышьяка и кадмия в природных средах (по мировым данным) // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 1 / Под ред. Ю.А. Израэля и Ф.Я. Ровинского. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С.14–35.
16. Ртуть. Проблемы геохимии, экологии, аналитики. М.: ИМГРЭ, 2005. 191 с.
17. Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: матер. Междунар. симпозиума (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: ГЕОХИ РАН, 2010. 477 с.
18. Ртуть: экологические аспекты применения. Совместное издание Программы ООН по окружающей среде, Международной организации труда и Всемирной организации здравоохранения. ВОЗ, Женева, 1992. 127 с.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/137516>
19. Сухенко С.А. Ртуть в водохранилищах: новый аспект биогенного загрязнения биосферы. Аналитич. обзор. Новосибирск: СО РАН, 1995. 59 с.
20. Федоров Ю.А., Овсепян А.Э. Ртуть и ее связь с физико-химическими параметрами воды (на примере рек севера ЕТР) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2006. № 2. С. 82–89.
21. Федоров Ю.А., Овсепян А.Э., Коробов В.Б. Особенности распределения, миграции и трансформации ртути в водах устьевой области р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 85–92.
22. Шилова Т.М. Химико-экологическая оценка речных вод г. Уссурийска: тяжелые металлы: автореф. ... канд. биол. наук. Уссурийск: Уссурийский государственный педагогический институт, 2000. 24 с.
23. Шулькин В.М. Тяжелые металлы в речных и прибрежно-морских экосистемах. Дис. ... доктора географ. наук. Владивосток: Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 2007. 298 с.
24. Шулькин В.М., Иевлев Д.И. О содержании ртути в природных водах Приморья // Вестник ДВО РАН. 2013. № 2. С. 98–105.
25. Эйрих А.Н., Третьякова Е.И., Папина Т.С. Аналитический контроль тяжелых металлов в донных отложениях речных экосистем (на примере реки Обь) // Мир науки, культуры, образования. 2009. № 5. С. 11–13.
26. Castello L., Zhulidov A.V., Gurtovaya T.Y., et al. Low and declining mercury in Arctic Russian rivers // Environmental Science and Technology. 2014. V. 48 (1). P. 747–752.
27. Gundersen C. B., Braaten H. F. V., Steindal E. H., et al. Mercury Risk Evaluation, Risk Management and Risk Reduction Measures in the Arctic (ARCRISK) (Interception Report No. REPORT SNO 7489–2020). Norwegian Institute for Water Research, 2020. 43 p.
28. Obrist D., Agnan Y., Jiskra M., et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution // Nature. 2017. 547 (7662). P. 201–204.
29. Schaefer K., Elshorbany Y., Jafarov E., et al. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost // Nature Communications. 2020. 11. P. 6.

LONG-TERM VARIABILITY IN THE CONTENT OF MERCURY COMPOUNDS IN RIVER ECOSYSTEMS OF RUSSIA ACCORDING TO MONITORING DATA

O. S. Reshetnyak^{a,b,#}

^a Hydrochemical Institute, Roshydromet Federal Service, ul. Stachki, 198, Rostov-on-Don, 344090 Russia

^b Institute of Geosciences, Southern Federal University, ul. Zorge, 40, Rostov-on-Don, 344090 Russia

[#]e-mail: olgare1@mail.ru

The article considers the problem of global mercury pollution of the environment, sources, forms of occurrence and features of mercury migration. Mercury compounds are included in the list of priority substances. Due to global transport processes, mercury compounds are found in almost all media of unpolluted natural ecosystems located all over the world. The objects of research are river ecosystems of various terrestrial ecosystems and altitudinal zones of Russia. The subject of research is the content of mercury compounds in the river waters of Russia. The objective of the study is to reveal the spatial variability in the content of mercury

compounds in river ecosystems over the past years. The long-term (1990–2014) regime hydrochemical data of the Roshydromet were used in this study. The long-term variability of the mercury compounds content is shown. The variability in mercury compounds content in river waters of different regions of Russia is presented according to the reference data and data from the regular monitoring of Roshydromet. A high heterogeneity of mercury compounds content in river water has been revealed. The content of mercury compounds varies widely from the values below the detection limit to $16.8 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in tundra and forest-tundra ecosystems, $1.62 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in taiga ecosystems, $0.184 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in mixed and hardwood forests, $3.15 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in forest-steppe ecosystems and up to $0.40 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in steppes, semi-deserts and deserts. The abnormally highest concentrations were noted in some places. When comparing long-term data with background levels of mercury in natural water, excesses are observed only for the anomalous values of concentrations. The median values of mercury concentrations in river water for the most part are below the detection limit. There is a danger of mercury pollution of river ecosystems due to its accumulation in ecosystems in the current circumstances of anthropogenic impact and unstable climatic changes. It is necessary to pay special attention to studying the dynamics of mercury content in river waters to prevent deterioration of water quality and the aquatic ecosystems state.

Keywords: mercury compounds, river ecosystems, natural areas, background level, multiplicity of exceeding MPC, extremely high level of water pollution

REFERENCES

- Vizhin, V.V., Gogolev, A.Z., Sagdeev, R.Z., Saprykin, A.V., Frizen, L.F. *Izmenenie kontsentratsii rtuti v vodakh Katuni* [Changes in the mercury concentration in the Katun River water]. *Vodnye resursy*, 1995, vol. 22, no. 1, pp. 67–77. (in Russian)
- Galatova, E.A. *Nakoplenie i raspredelenie ekotoksikantov v rechnoi vode (na primere reki Ui)* [Accumulation and distribution of ecotoxins in river water (by the example of the Uy River)]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2009, vol. 84, no. 1, pp. 19–21. (in Russian)
- Grosheva, E.I. *Rtut' v prirodnykh ob'ektakh r. Katun'* [Mercury in natural objects of the Katun River]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 1992, no. 2, pp. 53–57. (in Russian)
- Dmitriev, V.V., Frumin, G.T. *Ekologicheskoe normirovanie i ustoychivost' prirodnnykh sistem* [Environmental regulation and sustainability of natural systems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2004, 294 p. (in Russian)
- Zamana, L.V. *Rtut' v poverkhnostnykh vodakh Balei-Taseevskogo zolotopromyshlennogo uzla* [Mercury in the surface waters of the Baley-Taseevsky gold-mining unit]. *Zapiski Zabaikal'skogo otdeleniya RGO*, 2012, issue 131, pp. 83–89. (in Russian)
- Kozlova, S.I., Kulebakina, L.G., Zelyukova, Yu.V. *Soderzhanie rtuti v vode, vzyeshennom veshchestve i donnykh otlozheniyakh ust'voi zony reki Dunai* [The content of mercury in water, suspended matter and bottom sediments of the estuary zone of the Danube River]. *Vodnye resursy*, 1985, vol. 12, no. 1, pp. 155–159. (in Russian)
- Moiseenko, T.I., Gashkina, N.A. *Bioakkumulyatsiya rtuti v rybakh kak indikator urovnya zargyazneniya vod* [Bioaccumulation of mercury in fish as an indicator of the water pollution level]. *Geokhimiya*, 2016, no. 6, pp. 495–504. (in Russian)
- Moore, J., Ramamurthy, S. *Tyazhelye metally v prirodnykh vodakh: kontrol' i otsenka vliyaniya* [Heavy metals in natural waters: Control and impact assessment]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1987, 288 p. (in Russian)
- Nikanorov, A.M., Zhulidov, A.V., Pokarzhevskii, A.L. *Biomonitoring tyazhelykh metallov v presnovodnykh ekosistemakh* [Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 144 p. (in Russian)
- Nikanorov, A.M., Bryzgalo, V.A., Reshetnyak, O.S. *Reki Rossii v usloviyakh chrezvychaynykh ekologicheskikh situatsii* [Rivers of Russia in the conditions of environmental emergencies]. Rostov-on-Don, NOK Publ., 2012, 310 p. (in Russian)
- Papina, T.S., Artem'eva, S.S., Temerev, S.V. *Osobennosti migratsii rtuti v basseine Katuni* [Specifics of mercury migration in the Katun River basin]. *Vodnye resursy*, 1995, vol. 22, no. 1, pp. 60–66. (in Russian)
- Papina, T.S. *Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v ryadu: voda – vzyeshennoe veshchestvo – donnye otlozheniya rechnykh ekosistem* [Transport and distribution specifics of heavy metals in the row: water – suspended matter – bottom sediments of river ecosystems]. Novosibirsk, GPNTB SO RAN, IVEP SO RAN, 2001, 58 p. (in Russian)
- Papina, T.S. *Ekologo-analiticheskoe issledovanie raspredeleniya tyazhelykh metallov v vodnykh ekosistemakh basseina r. Ob'* [Ecological analytical study of the distribution of heavy metals in aquatic ecosystems of the Ob River basin]. Dr.Sci. (Chem.) Dissertation, Barnaul, Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, 2004, 259 p. (in Russian)
- Reshetnyak, O.S. *Otsenka effekta antropogennogo vozdeystviya i ekologicheskogo riska v ekosisteme Nizhnei Volgi* [Assessment of the anthropogenic impact effect and environmental risk in the Lower Volga River ecosystem]. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod* [Proc. of the Institute of Biology of Inland Waters]. 2018, issue 83 (86), pp. 23–31. (in Russian)
- Rovinsky F.Ya., Burtseva L.V., Petrukhin V.A., Cherkhanov Yu.P., Chicheva T.B. *Fonovoe sodержание svitsa, rtuti, myshyakai kadmiya v pripodnykh sredakh* [Background content of lead, mercury, arsenic and cadmium in natural environments (according to world data)]. Monitoring of background pollution of natural environments. Issue 1. Yu.A. Israel and F.Ya. Rovinsky (Eds). L.: Gidrometeoizdat, 1982, pp. 14–35.

16. *Rtut'. Problemy geokhimii, ekologii, analitiki* [Mercury. Problems of geochemistry, ecology, analytics]. Moscow, IMGRE Publ., 2005, 191 p. (in Russian)
17. *Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects]. Proc. Intern. Symposium (Moscow, Sept. 7–9, 2010). Moscow, GEOKHI RAN, 2010, 477 p. (in Russian)
18. *Rtut': ekologicheskie aspekt primeneniya* [Mercury: environmental aspects of use]. A joint publication of the United Nations Environment Programme, the International Labor Organization and the World Health Organization. WHO, Geneva, 1992. 127 p. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/137516> (in Russian)
19. Sukhenko, S.A. *Rtut' v vodokhranilishchakh: novyi aspekt biogennogo zagryazneniya biosfery* [Mercury in reservoirs: a new aspect of biogenic pollution of the biosphere]. Analytic. overview. Novosibirsk, SO RAN, 1995, 59 p. (in Russian)
20. Fedorov, Yu.A., Ovsepyan, A.E. *Rtut' i ee svyaz' s fiziko-khimicheskimi parametrami vody (na primere rek severa ETR)* [Mercury and its relationship with the physico-chemical parameters of water (by the example of the rivers in the European territory of Russia)]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seria: estestvennyye nauki*, 2006, no. 2, pp. 82–89. (in Russian)
21. Fedorov, Yu.A., Ovsepyan, A.E., Korobov, V.B. *Osobennosti raspredeleniya, migratsii i transformatsii rtuti v vodakh ust'evoi oblasti r. Severnaya Dvina* [Features of the distribution, migration and transformation of mercury in the water of the mouth area of the Severnaya Dvina River]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, no. 4, pp. 85–92. (in Russian)
22. Shilova, T.M. *Khimiko-ekologicheskaya otsenka rechnykh vod g. Ussuriyska: tyazhelye metally* [Chemical and ecological assessment of river waters in Ussuriysk: heavy metals]. Extended abstract of Cand. Sci. (Biol.) diss. Ussuriysk, Ussuriysk State Pedagogical Institute, 2000, 24 p. (in Russian)
23. Shul'kin, V.M. *Tyazhelye metally v rechnykh i pribrezhno-morskikh ekosistemakh* [Heavy metals in river and coastal marine ecosystems]. Doctoral Sci. (Geogr.) dissertation. Vladivostok, Pacific Institute of Geography, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, 2007, 298 p. (in Russian)
24. Shul'kin, V.M., Ievlev, D.I. *O sodержanii rtuti v prirodnykh vodakh Primor'ya* [On the content of mercury in natural water of Primorye]. *Vestnik DVO RAN*, 2013, no. 2, pp. 98–105. (in Russian)
25. Eirikh, A.N., Tretyakova, E.I., Papina, T.S. *Analiticheskii kontrol' tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh rechnykh ekosistem (na primere reki Ob)* [Analytical control of heavy metals in bottom sediments of river ecosystems (on the example of the Ob river)]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*, 2009, no. 5, pp. 11–13. (in Russian)
26. Castello, L., Zhulidov, A.V., Gurtovaya, T.Y., et al. Low and declining mercury in Arctic Russian rivers. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48 (1), pp. 747–752.
27. Gundersen, C.B., Braaten, H.F.V., Steindal, E.H., et al. Mercury risk evaluation, risk management and risk reduction measures in the Arctic (ARCRISK) (Inception Report No. REPORT SNO 7489-2020). Norwegian Institute for Water Research, 2020, p. 43.
28. Obrist, D., Agnan, Y., Jiskra, M., et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution. *Nature*, 2017, no. 547 (7662), pp. 201–204.
29. Schaefer, K., Elshorbany, Y., Jafarov, E., et al. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost. *Nature Communications*, 2020, no. 11, p. 6.