

Научная статья

Original article

УДК 55

doi: 10.55186/2413046X_2022_7_12_738

**СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА РТУТИ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ И ФАКТОРЫ, ЕЁ
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ
DAILY DYNAMICS OF MERCURY IN NATURAL WATERS AND FACTORS
DETERMINING IT**



Овсепян Ася Эмильевна, к.г.н., доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, ORCID : 0000-0002-6914-2539

Ovsepyan Asya E., Ph.D., Associate Professor Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University

Аннотация. Изучение суточной динамики ртути даёт возможность моделировать и прогнозировать временные особенности поведения металла и его соединений. Знание особенностей поведения металла в природных водах на примере конкретных водных объектов позволит разрабатывать рекомендации для оптимизации сети водозаборов с целью обеспечения хозяйственно-бытовых нужд населения, и минимизации возможного негативного воздействия на здоровье людей. В статье рассмотрены результаты современных исследований, направленных на выявление изменений концентраций ртути в воде, приземном слое атмосферы, определение направленности её потоков в разное время суток и для различных природных объектов. Целью работы явилось изучение суточной динамики концентраций ртути в природных водах, выявление факторов, влияющих на этот процесс. Для достижения цели был проведен эксперимент в дельте реки Северная Двина, когда в течение суток проводился отбор и анализ проб воды из поверхностного и придонного

горизонтов. Параллельно изучались физико-химические условия среды для анализа взаимосвязей. Это позволило имеющиеся в научном обиходе данные сравнить с результатами автора, полученными для устья реки в результате натурального эксперимента. Выявлено, что в дельте реки Северная Двина суточная динамика концентраций ртути зависит от различных факторов, причем для поверхностного и придонного горизонтов эти факторы отличаются. Значимые коэффициенты корреляции выявлены для суточного хода лишь с такими параметрами воды из исследованных, как содержание кислорода и валовой формой ртути в поверхностном горизонте вод ($r=0.54$), и pH и общей растворенной формой ртути в поверхностном горизонте ($r=0.61$). В остальных случаях коэффициенты корреляции между концентрациями ртути и исследованными параметрами оказались ниже уровня значимости.

Abstract. The study of the daily dynamics of mercury makes it possible to model and predict the temporal features of the behavior of the metal and its compounds. Knowledge of the features of the behavior of metal in natural waters on the example of specific water bodies will allow us to develop recommendations for optimizing the network of water intakes in order to meet the household needs of the population, and minimize the possible negative impact on human health. The article discusses the results of modern research aimed at identifying changes in mercury concentrations in water, the driving layer of the atmosphere, determining the direction of its flows at different times of the day and for various natural objects. The aim of the work was to study the daily dynamics of mercury concentrations in natural waters, to identify factors affecting this process. To achieve this goal, an experiment was conducted in the delta of the Northern Dvina River, when water samples from the surface and bottom horizons were taken and analyzed during the day. In parallel, the physicochemical conditions of the environment were studied to analyze the relationships. This allowed the data available in scientific use to be compared with the author's results obtained for the mouth of the river as a result of a full-scale experiment. It was revealed that in the delta of the Northern Dvina River, the daily dynamics of mercury concentrations depends on various factors, and these factors differ for the surface and bottom horizons. Significant correlation coefficients were found for the daily course only

with such water parameters from the studied ones as oxygen content and the gross form of mercury in the surface water horizon ($r=0.54$), and pH and the total dissolved form of mercury in the surface horizon ($r=0.61$). In other cases, the correlation coefficients between mercury concentrations and the studied parameters were below the significance level.

Ключевые слова: суточная динамика, ртуть, влияющие факторы, река Северная Двина

Keywords: daily dynamics, mercury, influencing factors, the Northern Dvina River

Введение

В настоящее время на фоне неугасающего интереса к изучению ртутного загрязнения окружающей среды – проводится все больше исследований, направленных на выявление суточных циклов ртути в атмосфере, воде, почвах, донных отложениях и других средах. В районах с различным уровнем антропогенной нагрузки устанавливаются станции, производящие непрерывное измерение концентраций ртути в атмосферном воздухе, ставятся эксперименты по изучению потоков металла. Целью всех этих исследований является установление закономерностей и факторов, определяющих поведение вещества первого класса опасности – ртути в различных средах.

С совершенствованием технической базы возникла возможность бесперебойного измерения ртути в атмосферном воздухе, отчасти с этим связано увеличение числа исследований на данную тематику в последние годы. Так, например, авторы [1] представили результаты своих более чем 2-х-летних (2018-2020 гг) наблюдений за динамикой концентраций газообразной элементарной ртути (ГЭР), проведенных на наземной станции мониторинга на южном побережье Италии. В ходе измерительной кампании также отслеживались метеорологические параметры для изучения изменчивости суточного цикла ГЭР. Авторы пришли к выводу, что увеличение концентраций ГЭР происходило при росте температуры воздуха и усилении ветра, что, по мнению исследователей, подтверждает в качестве потенциальных локальных источников ртути её поступление с окружающих поверхностей моря и суши, и связан этот процесс с механизмами фоторедукции [1].

Подобные исследования на протяжении 9-ти лет (с 2007 по 2015 гг) выполнялись авторами в Белтсвилле (Мэриленд, США) на относительно загрязненном ртутью пригородном участке [2]. В суточной динамике авторы выделили небольшой пик в утренние часы. Если говорить о сезонной динамике – наблюдались относительно низкие уровни осенью, а в межгодовом ходе концентраций было выявлено снижение в среднем на $0,020 \pm 0,007$ нг/м³ в год (или $1,3 \pm 0,5$ % в год) [2]. Также отмечается взаимосвязь между концентрациями газообразной элементарной ртути и усилением, и направлением ветра, что авторы объясняют влиянием близлежащих источников ртути.

Образование растворенной газообразной ртути (ГРР) и её последующее улетучивание в атмосферу являются частью биогеохимического цикла, способствуя удалению металла из водной среды и, таким образом, уменьшая объем, доступный для метилирования и биоаккумуляции. В этом контексте оценка газообразного обмена ртутью между водной толщей и атмосферой предоставляет полезную информацию о потенциальном воздействии ртути на окружающую среду. Авторами [3] измерялись потоки газообразной ртути в пресноводных водоемах, в прошлом подверженных загрязнению соединениями металла в результате воздействия хлорщелочной и горнодобывающей промышленности. Они пришли к выводам, что в летнее время поток из водной толщи усиливается, и инициируется этот процесс возрастанием температуры воды и усилением фоторедукции (связано с освещенностью). Эти выводы подтверждаются авторами [4], проводившими наблюдения в Триестском заливе Адриатического моря (Словения). Ими выявлено, что потоки газообразной элементарной ртути на границе раздела вода-атмосфера значительно выше летом (на 40 %) и коррелируют с солнечной радиацией и температурой воды, что подтверждает важность этих двух параметров для процессов фоторедукции и биотического восстановления Hg^{2+} до растворенной газообразной ртути, которая является летучей и легко выбрасывается в атмосферу в виде газообразной элементарной ртути. Интересно исследование авторов [5], когда параллельно изучались вариации суточных концентраций растворенной газообразной ртути и процесс флуоресценции растворенного органического

углерода на водных объектах Канады. Исследователи определили влияние средневолнового ультрафиолетового излучения, длинноволнового ультрафиолетового излучения и видимого света на процессы фотоиндукции и образования растворенной газообразной ртути. Была выявлена значимая взаимосвязь между концентрациями газообразной растворенной ртути и интенсивностью света, а также между выработкой ГРР и процессом флуоресценции растворенного органического углерода на всех участках исследования. Отмечено, что при ультрафиолетовом излучении в средневолновом диапазоне (UVB) выработка ГРР была выше в чистых озерах по сравнению с озерами с большими концентрациями гуминовых кислот, а при УФ-излучении длинноволнового спектра (UVA), образование газообразной растворенной ртути интенсивнее происходило в гуминовых озерах [5]. Исследователи [6] изучили роль микробного окисления и восстановления ртути в пресноводных озерах Онтарио и Джека. Пик концентраций ГРР отмечался между 9:00 и 10:30, снижаясь к 16:00. Активность микробной ртутьредуктазы (преобразует Hg^{2+} в Hg^0) повышалась с концентрацией ГРР, а активность оксидазы ртути (преобразует Hg^0 в Hg^{2+}) повышалась с уменьшением концентрации ГРР в середине дня. В эксперименте также показано, что активность оксидазы ртути была связана с суточными режимами перекиси водорода (H_2O_2), данные согласуются со следующей последовательностью событий: утром микробная активность продуцирует ГРР, по мере увеличения концентрации фотохимически образующегося H_2O_2 происходит биологически опосредованное снижение концентрации ГРР в течение второй половины дня. Таким образом, чтобы предсказать концентрацию газообразной растворенной ртути в поверхностных водах и скорости потока в атмосферу, вклад фоторедукции и фотоокисления должен учитываться совместно со скоростями восстановления и окисления обусловленными микробной активностью. Другие современные авторы также отмечают суточные закономерности в ходе концентраций газообразной элементарной ртути, тесно связанные с изменением солнечной радиации. Так, авторы, проводившие работы на озере Кейн-Крик (Теннесси, США), [7] пришли к выводу, что солнечная радиация, по-видимому, является основным фактором, контролирующим водно-воздушный

обмен ртутью, а скорость ветра оказывает вторичное влияние на перенос ртути из воды в воздух. Другие исследователи, проводившие измерения на пяти водохранилищах на реке Вуцзян, Гуйчжоу, Юго-западный Китай, также говорят о максимальных концентрациях газообразной ртути в атмосфере в дневное время. Авторы делают вывод, что температура воздуха может быть лучшим показателем для прогнозирования потоков ртути из воды для этих природных объектов [8]. Также отдельно выделим работу авторов [9], которые провели эксперимент на мезокосмах, измеряя ГРР и ГЭР в одном случае на мезокосме с закрытым дном, и в другом – на мезокосме с открытым дном. При этом испарение ртути в обоих мезокосмах значительно коррелировало с солнечной радиацией, а концентрации растворенной газообразной ртути уменьшались с глубиной в мезокосме с закрытым дном, но увеличивались с глубиной в мезокосме с открытым дном, что указывает на донные отложения как источник поступления ртути в водную толщу. Как видим, на суточный цикл концентраций ртути в различных средах влияет значительное число факторов, как природных, так и антропогенных. Причем в районах, подвергающихся или уже имеющих ртутное загрязнение, - поведение металла прогнозировать и моделировать сложнее, поскольку учитывать следует большее количество факторов (такие, как вторичное загрязнение, направление ветра и др.). Так, авторы [3], на фоне общей тенденции - интенсификации потока ртути в приводные слои воздуха в летний сезон, выявили, что из подвергавшихся ртутному загрязнению озер эти потоки были на порядок интенсивнее по сравнению с теми, которые наблюдаются в нетронутой среде. Всё это демонстрирует, что загрязненные участки ландшафтов даже спустя десятилетия после первичного поступления ртути, способны оказывать негативное влияние на окружающую среду. Под руководством автора в дельте реки Северная Двина, для которой длительное время ртуть являлась характерным загрязняющим веществом (стоки хлорных производств от целлюлозно-бумажного комбината), поставлен натуральный эксперимент по изучению суточной динамики концентраций ртути в воде реки Северная Двина, выявлению приоритетных факторов миграции и трансформации элемента.

Методы и принципы исследования

Для Российской территории подобные исследования все ещё являются уникальными. Станция отбора проб находилась в устье р. Северная Двина, г. Архангельск, Россия, - в 39 км выше по течению от морского края дельты (рис. 1). Исследования проводились в летний период (август), вода отбиралась из поверхностного и придонного горизонтов с периодичностью 3 часа. Параллельно определялись температура, содержание кислорода, Eh и pH воды. Изучались валовое содержание ртути и концентрации растворенной формы ртути (в отфильтрованных через мембранные фильтры с размером пор 0.45 мкм пробах воды). Определение ртути проводилось методом атомной абсорбции в холодном паре в аттестованной лаборатории Гидрохимического института. Подробнее с методикой отбора, консервации, подготовки и анализа проб можно ознакомиться в работах [10, 11, 12].

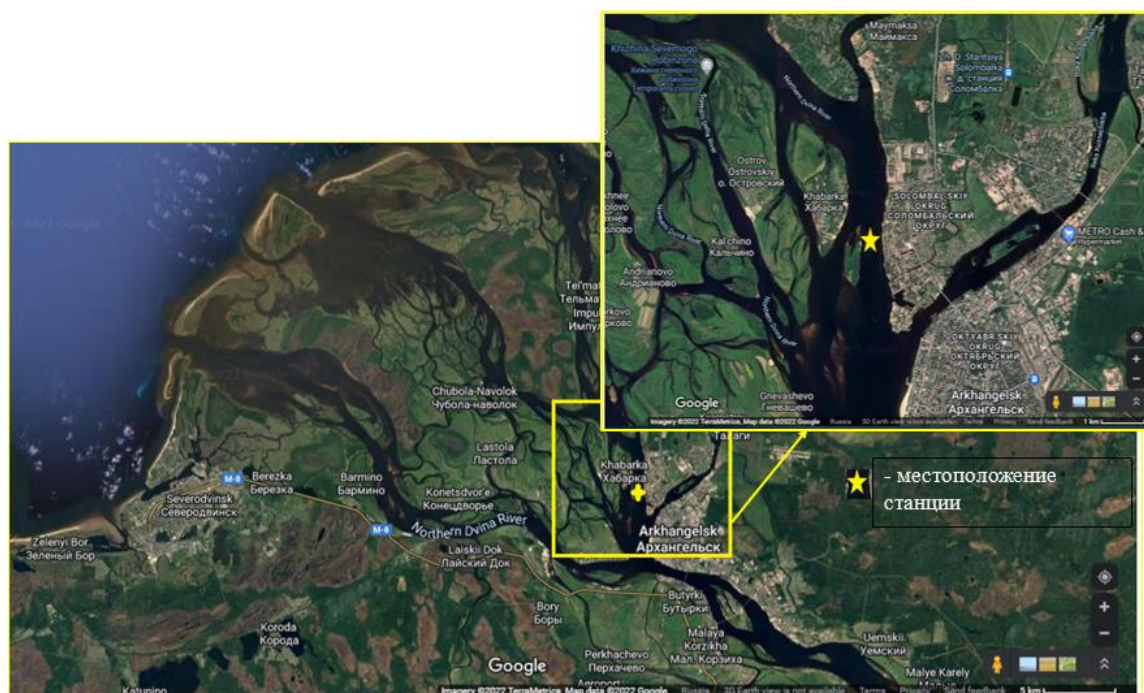


Рисунок 1 - Расположение станции отбора проб (выполнено с использованием google.maps)

Основные результаты

Концентрации валовой формы ртути изменялись в поверхностном горизонте в пределах: 0.002-0.095 мкг/л; в придонном горизонте: 0.007-0.062 мкг/л (рис. 2).

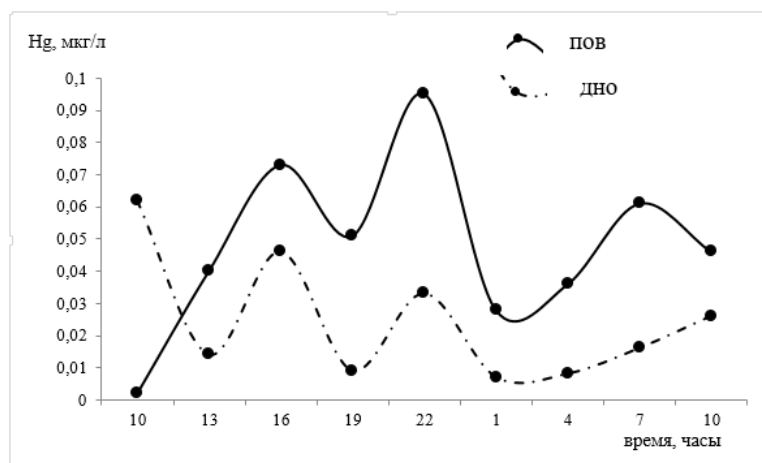


Рисунок 2 - Суточная динамика концентраций валовой формы ртути

Как видим, в поверхностном горизонте воды ярко выраженный максимум содержания валовой формы ртути приходится на 22 часа (0.095 мкг/л), также наблюдается ещё 2 пика концентраций: в 16 часов дня (0.073 мкг/л) и в 7 часов утра (0.061 мкг/л). Минимальные содержания характерны для 10 часов утра (0.002 мкг/л). Для придонного горизонта ход концентраций валовой формы ртути в целом повторяет картину, наблюдающуюся в поверхностном горизонте. В то же время имеются существенные отличия. Так, интервал колебания концентраций валовой формы ртути в воде придонного горизонта меньше, чем в поверхностном, а содержание ртути в среднем в 2 раза ниже. Пики концентраций в придонном горизонте также наблюдаются в 16 (0.046 мкг/л) и в 22 часа (0.033 мкг/л), максимальные значения выявлены в 10 часов утра (0.062 мкг/л). Минимальные концентрации обнаруживались в придонном горизонте в 1 час ночи (0.007 мкг/л).

Для общей растворенной формы ртути выявлены следующие особенности суточной динамики концентраций (рис. 3). В поверхностном горизонте содержание варьировало в пределах: 0.001-0.044 мкг/л, в придонном: 0.002-0.025 мкг/л.

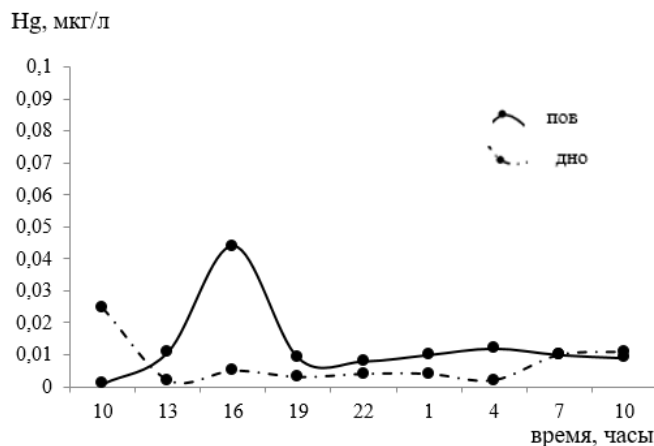


Рисунок 3 - Суточная динамика концентраций общей растворенной формы ртути

Для рассматриваемой формы ртути характерен в данном случае меньший разброс значений в целом, а также между поверхностным и придонным горизонтами. В среднем значения в поверхностном горизонте выше, чем в придонном в 1,8 раза. В суточном ходе выделяется значительный всплеск концентраций в 16 часов для поверхностного горизонта (0.044 мкг/л) и в 10 часов утра для придонного горизонта (0.025 мкг/л). Минимальные значения наблюдаются в поверхностном горизонте в 10 часов утра (0.001 мкг/л), в придонном горизонте в 13 часов дня и в 4 часа утра (0.002 мкг/л).

При анализе корреляционных зависимостей между суточным ходом концентраций различных форм ртути и таких параметров воды, как температура, содержание кислорода, pH и Eh, выявлено следующее.

Значимых коэффициентов корреляции между содержанием различных форм ртути и температурой воды для суточного хода не обнаружено. В то же время ранее нами были выявлены значимые взаимосвязи между температурой воды и различными формами миграции ртути в Северной Двине [13]. Возможно, отсутствие значимых связей в данном конкретном случае обусловлено малым диапазоном колебания температур (температура воды во время проведения эксперимента изменялась от 16,5 до 18,6°C).

Достаточно высокий коэффициент корреляции выявлен между содержанием кислорода и валовой формой ртути в поверхностном горизонте вод ($r=0.54$). В

остальных случаях значимых зависимостей для этих характеристик не получено (содержание кислорода в воде изменялось в пределах 5,92-7,84 мг/л).

Корреляционный анализ, направленный на выявление зависимостей между содержанием различных форм ртути и рН среды выявил значимые коэффициенты положительной корреляции лишь в случае для общей растворенной формы ртути в поверхностном горизонте ($r=0.61$). Значения рН изменялись в узком интервале от 7,38 до 7,74, то есть незначительно.

Величины окислительно-восстановительного потенциала характеризовались следующим разбросом: +64 ... +128,6 мВ. Значимых коэффициентов корреляции для различных форм ртути и E_h не выявлено. Все значения этого коэффициента оказались ниже 0,4.

Обсуждение

Исследование суточной изменчивости концентраций ртути в воде реки Северная Двина выявило большой разброс значений между максимальным и минимальным содержаниями для поверхностного и придонного горизонтов воды.

Важным гидродинамическим фактором, действующим в устье реки Северная Двина, являются приливно-отливные колебания уровня. Приливные воды могут оказывать на концентрации загрязняющих веществ и ртути в частности неоднозначное воздействие – с одной стороны происходит увеличение объема воды, с другой – подпор речных вод водами устьевого взморья. Так, воздействие приливов на концентрации ртути по трансекту Северная Двина – устьевое взморье описано в работе [13]. Отметим, что на станции отбора проб для эксперимента минерализация воды в среднем составляет 0,17 ‰, а колебания уровня в течение приливно-отливного цикла могут достигать 1 м, но проникновение солоноватых вод устьевого взморья в обычных условиях не происходит. Об этом свидетельствует отсутствие заметных изменений содержания хлор-иона за приливный цикл при штилевых условиях ни во времени, ни в пространстве [14]. Таким образом, во время прилива существенного колебания минерализации воды на станции не происходит, идет увеличение объема воды и подпор.

Наиболее высокие концентрации валовой формы ртути в воде отмечаются в поверхностном горизонте примерно в 22 часа. Отметим, что именно на 22 часа приходился максимальный уровень большой воды в период наблюдений. Имеющиеся данные [15] для рек бассейна Белого моря позволяют сделать вывод, что в некоторых случаях, приток морских вод увеличивает концентрации ртути в устьях рек. Конечно, это относится в основном к слабо загрязненным рекам, с низкими концентрациями элемента в воде и донных отложениях. В нашем случае – река Северная Двина является водным объектом, для которого ртуть долгое время числилась в списках характерных загрязняющих веществ [16], и накопленные уровни металла в устье выше, чем в водах Белого моря [17, 18]. Уточним, что имеющиеся уровни ртути обусловлены преимущественно антропогенным фактором, поскольку для водных объектов исследуемого района, не принимавших сточные воды предприятий, - характерны более низкие, фоновые концентрации [19, 20]. Однако, второй пик концентраций ртути в воде отмечался в 16 часов, что совпало с наименьшим уровнем малой воды. То есть взаимосвязь поведения ртути с приливно-отливной деятельностью на данной станции неоднозначна. Природу данного всплеска интересно было бы изучить дополнительно. Так, есть исследования, описывающие взаимосвязи между содержанием растворенной ртути и уровнем освещенности, который влияет на процессы фоторедукции и фотоокисления [5, 6]. Не исключено и влияние антропогенного фактора, поскольку выше по течению реки имеются потенциальные источники поступления ртути (промышленные и сельскохозяйственные предприятия городов Новодвинска, Архангельска).

В придонном горизонте суточный ход концентраций валовой формы ртути отличается тем, что первый пик приходится на 10 часов утра, и это согласуется с данными многих исследователей [5, 6, 7]. Вероятно, механизм одинаков – а именно поступление ртути из донных отложений вследствие активизации процессов биологического метилирования ртути, высвобождения ртутьсодержащих соединений зообентосом, десорбции ртути с поверхности донных отложений. Если предположить, что высвободившаяся из донных отложений ртуть мигрирует от

придонного к поверхностному горизонту, постепенно увеличивая там концентрации – данный процесс может объяснить ход концентраций, отраженный на рис. 2. На графике можно наблюдать снижение концентраций в придонном, начиная с 10 часов, и в это же время - рост содержания валовой формы ртути в поверхностном слое.

Пик, отмечавшийся в 16 часов – также требует дополнительных данных. Это можно было бы объяснить влиянием фоторедукционных процессов, однако не стоит забывать, что река все еще подвержена воздействию хозяйственно-бытовых и промышленных стоков, то есть присутствует вероятность, что данный пик связан с загрязненными сточными водами.

Для общей растворенной формы ртути ярко выраженный пик отмечается в поверхностном горизонте также в 16 часов, а в придонном – приходится на 10 часов, 16 часов, что отчасти согласуется как с нашими данными, так и с данными коллег [6], изучавших суточную динамику ртути на других водных объектах.

Значимые коэффициенты корреляции выявлены между содержанием кислорода и валовой формой ртути ($r=0.54$), рН и общей растворенной формой ртути в поверхностном горизонте ($r=0.61$). Для рН также отмечается ярко выраженный пик в 16 часов. Если это обусловлено сбросом сточных вод – в таком случае это были воды, обогащенные соединениями ртути, с повышенным рН (от 7,7 и выше), скорее всего также содержащие другие загрязняющие вещества (соединения тяжелых металлов). Однако, наличие взаимосвязи с рН и содержанием кислорода в наиболее освещенном поверхностном горизонте воды, позволяет говорить о роли фотосинтеза и водных организмов, влияющих на суточный цикл ртути. Отсутствие значимых взаимосвязей с другими изученными параметрами воды говорит о наличии неучтенных влияющих факторов, которые необходимо исследовать и учитывать при прогнозировании уровней ртути в воде.

Заключение

Обработка результатов исследования показала наличие значительных изменений всех изученных форм ртути в воде в течение суток. В суточной изменчивости концентраций ртути самые низкие содержания в воде характерны для периода между 1 часом ночи и 7 часами утра. На это время в период постановки

эксперимента приходился спад большой воды, а также наименьшие температуры, и, предположительно, снижение интенсивности сброса в реку загрязненных сточных вод.

В придонном горизонте воды испытывают воздействие вторичного загрязнения из донных отложений, механизм высвобождения ртути, скорее всего, связан с деятельностью микроорганизмов.

В поверхностном горизонте концентрации воды выше, чем в придонном, что связано с высокой пиковой концентрацией ртути, выявленной для всех слоев в 16 часов, и возможно связанной с воздействием сточных вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

На суточную динамику концентраций ртути оказывает влияние множество различных факторов, причем для поверхностного и придонного горизонтов эти факторы отличаются. В то же время значимые коэффициенты корреляции выявлены для суточного хода лишь с такими параметрами воды из исследованных, как содержание кислорода и валовой формой ртути в поверхностном горизонте вод ($r=0.54$), и рН и общей растворенной формой ртути в поверхностном горизонте ($r=0.61$), что позволяет говорить о роли фотосинтеза и водных организмов, влияющих на суточный цикл ртути. В остальных случаях коэффициенты корреляции между концентрациями ртути и исследованными параметрами оказались ниже уровня значимости.

Воздействие приливно-отливных процессов неочевидно, и требует дополнительных исследований.

Роль антропогенного фактора в суточной динамике ртути для реки исключать не следует.

Установленные отличия в поведении и содержании ртути в поверхностном и придонном горизонтах воды говорят о воздействии различных факторов на суточную динамику ртути в этих горизонтах.

Список источников

1. Martino M First atmospheric mercury measurements at a coastal site in the Apulia region: seasonal variability and source analysis. / M Martino, A Tassone, L Angiuli et al. //

- Environmental Science and Pollution Research. — 2022. — 29. — p. 68460–68475. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-20505-6> (accessed: 22.11.22). — DOI: 10.1007/s11356-022-20505-6
2. Xinrong R Atmospheric mercury measurements at a suburban site in the Mid-Atlantic United States: Inter-annual, seasonal and diurnal variations and source-receptor relationships. / R Xinrong, T.L. Winston, P. Kelley et al. // Atmospheric Environment. — 2016. — 146. — p. 141-152. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016306215?via%3Dihub> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.028
3. Floreani Federico Gaseous Mercury Exchange from Water–Air Interface in Differently Impacted Freshwater Environments. / Federico Floreani, Alessandro Acquavita, Nicolò Barago et al. // Environmental Research and Public Health. — 2022. — 19(13). — p. 8149. — URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/13/8149> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.3390/ijerph19138149
4. Floreani F Diurnal fluxes of gaseous elemental mercury from the water-air interface in coastal environments of the northern Adriatic Sea. / F Floreani, A Acquavita, E Petranich et al. // Science of The Total Environment. — 2019. — 668. — p. 925-935. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719309908?via%3Dihub> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.012
5. Garcia E Relationship between DOC photochemistry and mercury redox transformations in temperate lakes and wetlands. / E Garcia, M Amyot, P.A. Ariya // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2005. — 68(8). — p. 1917-1924. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703704008531> (accessed: 20.11.22). — DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2004.10.026
6. Siciliano S.D. Microbial reduction and oxidation of mercury in freshwater lakes. / S.D. Siciliano, N.J. O'Driscoll, D.R.S. Lean // Environ Sci Technol. — 2002. — 36(14). — p. 3064-8. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12141483/> (accessed: 22.11.22). — DOI: 10.1021/es010774v
7. Crocker W.C. Seasonal and Diurnal Variation of Air/Water Exchange of Gaseous Mercury in a Southern Reservoir Lake (Cane Creek Lake, Tennessee, USA). / W.C.

Crocker, H Zhang // *Water* . — 2020. — 12(8). — p. 2102. — URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/8/2102> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.3390/w12082102

8. Fu X Distribution and production of reactive mercury and dissolved gaseous mercury in surface waters and water/air mercury flux in reservoirs on Wujiang River, Southwest China. / X Fu, X Feng, Y Guo et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2013. — 118. — p. 3905-3917. — URL: <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-03620496> (accessed: 22.11.22). — DOI: [10.1002/jgrd.50384](https://doi.org/10.1002/jgrd.50384)

9. O’Driscoll N.J. Dissolved Gaseous Mercury Concentrations and Mercury Volatilization in a Frozen Freshwater Fluvial Lake. / N.J. O’Driscoll, L. Poissant, J. Canário et al. // *Environ. Sci. Technol.*. — 2008. — 42(14). — p. 5125–5130. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es800216q> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.1021/es800216q

10. Федоров ЮА Комплексная эколого-геохимическая экспедиция в устьевой области Северной Двины в зимний сезон 2008 г. / ЮА Федоров, АЭ Овсепян, АА Зимовец и др. // *Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Серия: естественные науки.*. — 2009. — 1(149). — с. 110-114. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12224249> (дата обращения: 21.11.22).

11. Zimovets A.A. Geochemical specific features of aquatic landscapes of the Northern Dvina River mouth area. / A.A. Zimovets, Yu.A. Fedorov, AE Ovsepyan // 16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016; — Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2016. — p. 319-326. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42823597>.

12. Ovsepyan AE Diurnal dynamics of mercury in water objects of the North European part of Russia. / AE Ovsepyan, YuA Fedorov, AA Zimovets et al. // 16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016; — Sofia: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2016. — p. 243-250. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42832147>.

13. Овсепян АЭ Ртуть в устьевой области реки Северная Двина / АЭ Овсепян, ЮА Федоров — Ростов-на-Дону: ЗАО "Ростиздат", 2011. — 198 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35354873>. doi: doi.org/10.12731/978-5-7509-1274-2
14. Зотин МИ Гидрология устьевой области Северной Двины / МИ Зотин, ВН Михайлов — М.: Гидрометеиздат, 1965. — 376 с.
15. Fedorov YuA Mercury in the water of small rivers of the Onega Bay basin of the White Sea. / YuA Fedorov, AE Ovsepyan, VA Savitsky et al. // Doklady Earth Sciences. — 2019. — 487(1). — p. 804-806. — DOI: 10.1134/S1028334X19070109
16. Федоров ЮА Геохимические особенности формирования элементарных аквальных ландшафтов устьевой области р. Северная Двина. / ЮА Федоров, АА Зимовец, АЭ Овсепян // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод; — Ростов-на-Дону: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Гидрохимический институт", 2015. — с. 322-326.
17. Fedorov YuA Mercury in White Sea bottom sediments: distribution, sources, and deposition chronology. / YuA Fedorov, AE Ovsepyan, V.A. Savitsky et al. // Oceanology. — 2019. — 59(1). — p. 143-150.
18. Зимовец А.А. Тяжелые металлы в почвах устьевой области реки Северная Двина // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2013. № 5 (177). С. 70-74.. / А.А. Зимовец, ЮА Федоров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: естественные науки. — 2013. — 5(177). — с. 70-74. (дата обращения: 15.12.22).
19. Ovsepyan AE Features of accumulation of mercury in the bottom sediments of lakes in Arkhangelsk and its surrounding area . / AE Ovsepyan, YuA Fedorov, AA Zimovets et al. // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015; — Sofia: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи , 2015. — p. 353-360.
20. Овсепян АЭ Ртуть в воде и донных отложениях озер г. Архангельска и окружающих территорий. / АЭ Овсепян // Астраханский вестник экологического образования. — 2018. — 6(48). — с. 77-89. (дата обращения: 15.12.22).

References

1. Martino M First atmospheric mercury measurements at a coastal site in the Apulia region: seasonal variability and source analysis. / M Martino, A Tassone, L Angiuli et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2022. — 29. — p. 68460–68475. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-20505-6> (accessed: 22.11.22). — DOI: 10.1007/s11356-022-20505-6
2. Xinrong R Atmospheric mercury measurements at a suburban site in the Mid-Atlantic United States: Inter-annual, seasonal and diurnal variations and source-receptor relationships. / R Xinrong, T.L. Winston, P. Kelley et al. // *Atmospheric Environment*. — 2016. — 146. — p. 141-152. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016306215?via%3Dihub> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.028
3. Floreani Federico Gaseous Mercury Exchange from Water–Air Interface in Differently Impacted Freshwater Environments. / Federico Floreani, Alessandro Acquavita, Nicolò Barago et al. // *Environmental Research and Public Health*. — 2022. — 19(13). — p. 8149. — URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/13/8149> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.3390/ijerph19138149
4. Floreani F Diurnal fluxes of gaseous elemental mercury from the water-air interface in coastal environments of the northern Adriatic Sea. / F Floreani, A Acquavita, E Petranich et al. // *Science of The Total Environment*. — 2019. — 668. — p. 925-935. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719309908?via%3Dihub> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.012
5. Garcia E Relationship between DOC photochemistry and mercury redox transformations in temperate lakes and wetlands. / E Garcia, M Amyot, P.A. Ariya // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2005. — 68(8). — p. 1917-1924. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703704008531> (accessed: 20.11.22). — DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2004.10.026
6. Siciliano S.D. Microbial reduction and oxidation of mercury in freshwater lakes. / S.D. Siciliano, N.J. O'Driscoll, D.R.S. Lean // *Environ Sci Technol*. — 2002. — 36(14). — p.

- 3064-8. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12141483/> (accessed: 22.11.22). — DOI: 10.1021/es010774v
7. Crocker W.C. Seasonal and Diurnal Variation of Air/Water Exchange of Gaseous Mercury in a Southern Reservoir Lake (Cane Creek Lake, Tennessee, USA). / W.C. Crocker, H Zhang // *Water*. — 2020. — 12(8). — p. 2102. — URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/8/2102> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.3390/w12082102
8. Fu X Distribution and production of reactive mercury and dissolved gaseous mercury in surface waters and water/air mercury flux in reservoirs on Wujiang River, Southwest China. / X Fu, X Feng, Y Guo et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2013. — 118. — p. 3905-3917. — URL: <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-03620496> (accessed: 22.11.22). — DOI: 10.1002/jgrd.50384
9. O'Driscoll N.J. Dissolved Gaseous Mercury Concentrations and Mercury Volatilization in a Frozen Freshwater Fluvial Lake. / N.J. O'Driscoll, L. Poissant, J. Canário et al. // *Environ. Sci. Technol.*. — 2008. — 42(14). — p. 5125–5130. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es800216q> (accessed: 22.11.22). — DOI: doi.org/10.1021/es800216q
10. Fedorov YuA Kompleksnaya e'kologo-geoximicheskaya e'kspediciya v ust'evoj oblasti Severnoj Dviny' v zimnij sezon 2008 g. [Complex ecology and geochemical expedition in Northern Dvina estuary during the winter season in 2008]. / YuA Fedorov, AE' Ovsepyan, AA Zimovecz et al. // *Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Severo-kavkazskij region. Seriya: estestvenny'e nauki. [Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural Sciences]*. — 2009. — 1(149). — p. 110-114. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12224249> (accessed: 21.11.22). [in Russian]
11. Zimovets A.A. Geochemical specific features of aquatic landscapes of the Northern Dvina River mouth area. / A.A. Zimovets, Yu.A. Fedorov, AE Ovsepyan // 16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016; — Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2016. — p. 319-326. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42823597>.

12. Ovsepyan AE Diurnal dynamics of mercury in water objects of the North European part of Russia. / AE Ovsepyan, YuA Fedorov, AA Zimovets et al. // 16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016; — Sofia: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2016. — p. 243-250. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42832147>.
13. Ovsepyan AE' Rtut' v ust'evoj oblasti reki Severnaya Dvina [MERCURY IN THE NORTHERN DVINA RIVER ESTUARINE AREA] / AE' Ovsepyan, YuA Fedorov — Rostov-na-Donu: ZAO "Rostizdat", 2011. — 198 p. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35354873>. doi: doi.org/10.12731/978-5-7509-1274-2 [in Russian]
14. Zotin MI Hidrologiya ust'evoj oblasti Severnoj Dviny' [Hydrology of the estuarine region of the Northern Dvina River] / MI Zotin, VN Mixajlov — M.: Gidrometeoizdat, 1965. — 376 p. [in Russian]
15. Fedorov YuA Mercury in the water of small rivers of the Onega Bay basin of the White Sea. / YuA Fedorov, AE Ovsepyan, VA Savitsky et al. // Doklady Earth Sciences. — 2019. — 487(1). — p. 804-806. — DOI: 10.1134/S1028334X19070109
16. Fedorov YuA Geoximicheskie osobennosti formirovaniya e'lementarny'x akval'ny'x landshaftov ust'evoj oblasti r. Severnaya Dvina [Geochemical features of the formation of elementary aquatic landscapes of the estuarine region of the Northern Dvina]. / YuA Fedorov, AA Zimovecz, AE' Ovsepyan // Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality; — Rostov-na-Donu: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie "Gidroximicheskij institut", 2015. — p. 322-326. [in Russian]
17. Fedorov YuA Mercury in White Sea bottom sediments: distribution, sources, and deposition chronology. / YuA Fedorov, AE Ovsepyan, V.A. Savitsky et al. // Oceanology. — 2019. — 59(1). — p. 143-150.
18. Zimovecz A.A. Tyazhely'e metally' v pochvax ust'evoj oblasti reki Severnaya Dvina // Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Estestvenny'e nauki. 2013. № 5 (177). S. 70-74. [Heavy metals in the soils of the Northern Dvina River]. / A.A. Zimovecz, YuA Fedorov // Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: estestvenny'e nauki [Bulletin of higher educational institutions.

North Caucasus region. Natural sciences]. — 2013. — 5(177). — p. 70-74. (accessed: 15.12.22). [in Russian]

19. Ovsepyan AE Features of accumulation of mercury in the bottom sediments of lakes in Arkhangelsk and its surrounding area . / AE Ovsepyan, YuA Fedorov, AA Zimovets et al. // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015; — Sofia: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи , 2015. — p. 353-360.

20. Ovsepyan AE' Rtut' v vode i donny'x otlozheniyax ozer g. Arxangel'ska i okruzhayushhix territorij [Mercury in water and bottom sediments of lakes of Archangel'sk city and it's surrounding area]. / AE' Ovsepyan // Astraxanskij vestnik e'kologicheskogo obrazovaniya [Asrakhan bulletin of ecological education]. — 2018. — 6(48). — p. 77-89. (accessed: 15.12.22). [in Russian]

Для цитирования: Овсепян А.Э. Суточная динамика ртути в природных водах и факторы, её определяющие // Московский экономический журнал. 2022. № 12. URL: <https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-12-2022-41/>

© Овсепян А.Э, 2022. Московский экономический журнал, 2022, № 12.