

Ртуть в атмосферном воздухе в фоновых районах стран Северной, Центральной и Восточной Европы

Л.В. Бурцева, М.С. Александрова, Е.А. Позднякова, И.М. Брускина*

ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

*Адрес для переписки: mkotorova.igce@gmail.com

Реферат. Рассмотрены результаты мониторинга концентраций ртути в атмосферном воздухе заповедных зон стран Северной, Центральной Европы и Европейской части России, в период 2011-2015 г. и 2021 г. Показано, что современные оценки и полученные в 1980-е годы, соизмеримы. В атмосфере по-прежнему доминирует газообразная форма ртути. Вклад аэрозольной составляющей не превышает 0.6% общего содержания элемента. По данным, полученным в арктических районах, современный уровень глобального фона ртути в атмосфере северного полушария составляет 1.5-1.7 нг/м³. В странах Северной и Центральной Европы, а также на западе и востоке Восточно-Европейской равнины региональные концентрации сравнимы с оценками глобального фона, стабильны во времени, однородны в географическом пространстве. В центральной части Восточно-Европейской равнины средние концентрации почти в 2 раза выше глобального фона. В целом, в атмосфере исследуемых регионов Европы фоновые концентрации ртути крайне низкие, составляют в среднем не более 1.2% нормы ПДК, принятой в России, и формируются, главным образом, природными источниками эмиссии ртути в атмосферу.

Ключевые слова. Фоновый мониторинг, атмосферный воздух, концентрация, ртуть, пространственно-временная изменчивость.

Mercury in the atmospheric air in the background areas of the Nordic countries, Central and Eastern Europe

L.V. Burtseva, M.S. Aleksandrova, E.A. Pozdnyakova, I.M. Bruskin*

Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: mkotorova.igce@gmail.com

Abstract. The results of monitoring mercury concentrations in the atmospheric air of the protected areas of the countries of Northern, Central Europe

and the European part of Russia in the period 2011-2015 and 2021 are considered. It is shown that the current estimates and those obtained in the 1980^s are commensurate. The gaseous form of mercury still dominates the atmosphere. The contribution of the aerosol component does not exceed 0.6% of the total content of the element. According to the data obtained in the Arctic regions, the current level of the global background of mercury in the atmosphere of the northern hemisphere is 1.5-1.7 ng/m³. In the countries of Northern and Central Europe, as well as in the west and east of the East European Plain, regional concentrations are comparable to estimates of the global background, stable over time, and homogeneous in geographical space. In the central part of the East European Plain, the average concentrations are almost 2 times higher than the global background, which, as the analysis showed, is due to the influence of the Moscow metropolis. In general, background concentrations of mercury in the atmosphere of the studied regions of Europe are extremely low, averaging no more than 1.2% of the MPC norm adopted in Russia, and are formed mainly by natural sources of mercury emissions into the atmosphere.

Keywords. Background monitoring, atmospheric air, concentration, mercury, spatial and temporal variability.

Введение

Ртуть, по степени токсичности, возглавляет ряд самых опасных загрязняющих окружающую среду металлов. Ртуть среди них является единственным глобальным загрязняющим веществом, присутствует в атмосфере, главным образом, в элементарной форме, отличается низкой растворимостью в воде, длительным периодом жизни в атмосфере (от 0.8 месяца до 1.7 года) и в результате распространяется на большие расстояния (Gonzalez-Raymat et al., 2017). Широко используется в большом числе технологических циклов, неизбежно сопровождающихся антропогенной эмиссией элемента в атмосферу.

По оценкам Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) техногенная эмиссия ртути на 2010 г. в глобальном масштабе составляла 1960 т/год (средняя величина диапазона 1010-4070 т/год) (Штайнер, 2013). Её источниками являются процессы: переработки руд; сжигания каменного угля, газа, сланцев, биотоплива, бытовых отходов; производства цветных и других металлов, цемента, извести, хлора и др.; использование пестицидов, биоцидов, красок и др. В России общая эмиссия ртути в атмосферу предприятиями черной металлургии в 2001 г. оценивалась примерно в 2 т/год (Янин, 2004б). Объемы выбросов ртути в атмосферу из антропогенных источников в 2015 году составил 2220 т, диапазон вариации 2000-2820 т. (GMA-2018, 2019). Преимущественная доля антропогенной эмиссии ртути в 2015 приходилась на кустарную и мелкомасштабную добычу золота (37.7%) 838 т (диапазон вариации 675-1000 т), на сжигание угля – 13.1%, 292 т (диапазон вариации 255-346 т), на производство цемента – 10.5% (сырье и топливо, без угля) 233 т (диапазон вариации 117-782 т).

Природная эмиссия ртути на 2008 г. оценивалась в 5207 т/год, из них 2682 т – поступление из океана, 96 т – из озер, 888 т – от лесных массивов и пустошей, 128 т – от сельскохозяйственных территорий, 765 т – в результате лесных пожаров и вулканических выбросов (Pittone et al., 2010). Объемы природной эмиссии ртути в 2015 году практически не изменились и составили по данным GMA-18 (2019) около 5500 т/год.

Проблема загрязнения ртутью природной среды привлекает пристальное внимание исследователей более 50-ти лет. Триггером широкомасштабных исследований загрязнения окружающей среды ртутью послужили привлекавшие внимание мировой общественности массовые отравления национального масштаба: в 50-х годах прошлого века в японском городе Минамата, в 1970 г. в Онтарио, в 1959-1960 гг. и зимой 1971-1972 г. в Ираке (Конюхова, 2017). На основе полученных результатов разработан ряд предложений по снижению поступления ртути в окружающую среду. В ЮНЕП была принята программа по ртути, в рамках которой разработана «Международная Минаматская конвенция по ртути», принятая и подписанная рядом стран в 2013 году, вступившая в силу в 2017 г. Россия подписала конвенцию в 2014 г.

Конвенция обязывает страны не только регулировать использование ртути в промышленности, в медицинских и бытовых приборах, но и осуществлять сотрудничество в деле «географически репрезентативного» мониторинга уровней ртути и ртутных соединений в компонентах окружающей среды (статья 19)¹⁾.

Исследования, выполненные 1980-е годы, показали, что ртуть, поступающая в атмосферу от источников эмиссии, расположенных на Европейском континенте, достигает арктических широт и депонируется там (Brosset, 1987). Поэтому мониторинг загрязнения ртутью приземной атмосферы актуален как для территорий, где расположены источники ее эмиссии, так и на большом расстоянии от них, в так называемых фоновых районах, для оценки эффективности мероприятий Минаматской конвенции.

В поддержку конвенции действует глобальная сеть наблюдений за ртутью (GMOs), собирающая данные о концентрациях ртути в атмосферном воздухе, осадках и поверхностных водах по всему миру для оценки глобальных тенденций загрязнения ртутью (по данным, полученным в фоновых районах) и выявления аномальных ситуаций²⁾.

К 2000-ным годам уже существовали международные сети мониторинга загрязнения окружающей среды, работающие по программам наблюдений за ртутью: ЕМЕП (Совместная программа наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе), действующая в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, (Конвенция о трансграничном..., 1979); АМАП – программа мониторинга и оценки Арктики (Программа мониторинга..., 1991); КФМ –

¹⁾ https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/information_document/Minamata-Convention-booklet-rus-full.pdf.

²⁾ <https://msceast.org/general-information-ru/programma-emep>; <https://www.unep.org/gmos>

Комплексный фоновый мониторинг, организованный в конце 1970-х – начале 1980-х гг., на заповедных территории бывших стран СНГ³⁾. В настоящее время КФМ реализуется в России, как блок государственного мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета (Громов, Парамонов, 2015).

С 1999 года наблюдения за ртутью стали частью программы ЕМЕП в Европе. Географический охват за наблюдениями включал территории стран Северной и Центральной Европы и Европейской территории России. Однако вследствие финансовых сложностей к настоящему времени лишь ограниченное число станций ЕМЕП и КФМ проводят мониторинг ртути в атмосфере.

В системе КФМ систематические долговременные измерения суммарной ртути на действующей фоновой станции в Приокско-Тerrasном государственном биосферном заповеднике, а также эпизодические рекогносцировочные измерения на территориях планируемого размещения станций КФМ осуществляются на Восточно-Европейской равнине.

К настоящему времени накоплен большой массив данных о содержании различных форм ртути в атмосфере и атмосферных осадках. Данные, полученные на станциях ЕМЕП, публикуются в ежегодных отчетах⁴⁾ (Heavy metal and POP..., 2017), в системе КФМ аккумулируются в банке данных – «Фоновый мониторинг» Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ) (Бурцева и др., 2021; Бурцева, 2022).

Одна из объединяющих ЕМЕП и КФМ задач – установить базовый (фоновый) уровень загрязнения атмосферного воздуха, его пространственную и временную изменчивость на региональном и глобальном уровне компонентами, включающими ртуть. В соответствии с этой задачей выполнен сравнительный анализ полученных в 2011-2015 гг. и 2021 г. концентраций ртути в атмосферном воздухе, характеризующих состояние фонового загрязнения атмосферы ртутью в обширных регионах Европы, в которых реализуются программы ЕМЕП и КФМ. Результаты анализа представлены в настоящей работе.

Информационная и методическая база

В системах ЕМЕП и КФМ приняты единые критерии выбора месторасположения станций наблюдения, которые состоят в следующем: удаление от крупных источников загрязнения (города, электростанции, главные дороги) на 50 км; от малых дорог, маломощных систем домашнего отопления углем, мазутом или дровами минимум на 500 м (ЕМЕР Manual for Sampling..., 2001). Таким критериям отвечают природные заповедные территории, в частности, Государственные биосферные заповедники.

В России региональная станция наблюдения КФМ работает в Московской области, на территории Приокско-Тerrasного государственного биос-

3) Комплексный фоновый мониторинг состояния и загрязнения природной среды (КФМ) (Integrated background monitoring of environmental pollution (IBMon)) – ИГКЭ, <http://www.igce.ru/ibmon/>

4) <https://ebas.nilu.no/>

ферного заповедника, охранный зона которого – 4683 га. Расположена в 83 км к югу от Москвы (мегаполис) и в 70 км от г. Подольска (население – 312 400 чел.). В 75 км на юг от ГБЗ – промышленно-развитый г. Тула (областной центр, население – 542 516 человек), в 12 км на запад – г. Серпухов (население – 133 645 человек⁵⁾). В г. Серпухове высокотемпературные источники антропогенной эмиссии ртути отсутствуют. В г. Подольске функционирует завод по производству цемента, в выбросах которого, как правило, присутствует ртуть (Янин, 2004а).

Рекогносцировочные измерения выполнялись на будущих станциях КФМ на территориях Национального Парка «Смоленское Поозерье» и Волжско-Камского государственного биосферного заповедника. Станция «Национальный парк Смоленское Поозерье» расположена в Смоленской области, на западе Восточно-Европейской равнины, в зоне смешанных лесов, Волжско-Камский государственный биосферный заповедник – на территории Республики Татарстан, в 60 км к югу от столицы (г. Казань), на берегу Куйбышевского водохранилища, в зоне лесных и лесостепных экосистем среднего Поволжья.

Измерения концентраций ртути в атмосферном воздухе фоновых районов в рамках программы ЕМЕП в 2011-2015 гг. и 2021 г. проводились на территориях 11 стран северной и центральной Европы. Наиболее полные массивы данных получены на фоновых территориях 7 стран на 2-х глобальных и на 14-ти региональных станциях наблюдения (табл. 1). Станции, идентифицируемые, как «глобальные» расположены в Арктическом регионе. В настоящей работе использованы данные за рассматриваемый период, представленные в отчетах ЕМЕП (Heavy metal and POP..., 2017; Aas, Breivik, 2013; Aas, Bohlin-Nizzetto, 2014; 2017; Aas, Nizzetto, 2015; Aas et al., 2016) и в банке данных «Фоновый мониторинг» (Бурцева и др., 2021; Бурцева, 2022).

При едином подходе в выборе мест размещения станций наблюдения существуют значительные различия между странами в средствах и методах измерений ртути.

По программе ЕМЕП в разных странах, в зависимости от используемой аппаратуры, проводятся измерения ежесуточные, недельные, часовые, с непостоянным годовым массивом данных. Используется два способа измерения ртути. Первый – газоанализатором Tekran-2537X, фиксирующим концентрацию в заданном интервале времени, второй – накоплением ртути на золотом сорбенте, аналогично методу КФМ. Газоанализатором Tekran-2537X при разном времени экспозиции измерялась: общая газообразная ртуть, включающая пары металлической ртути, газообразные органические и неорганические соединения, среднечасовая газообразная, аэрозольная и реакционноспособная (Heavy metal and POP..., 2017). Из массива данных ЕМЕП использованы значения концентраций общей газообразной ртути и аэрозольной. Большой объем массива данных за шестилетний период позволяет, в некоторой степени, нивелировать существующие различия в программах измерений на станциях ЕМЕП.

⁵⁾ <https://rosstat.gov.ru>

Таблица 1. Станции фонового мониторинга концентраций ртути в воздухе

Table 1. Background monitoring stations for mercury in the air

Регион	Территория	Станция	Статус станции
Арктика	1. Гренландия	Nord	Глобальная
	2. о. Шпицберген	Zeppelin	Глобальная
Северная Европа	3. Великобритания	Harwell	Региональная
		Auchencorth Moss	Региональная
	4. Норвегия	BirkenesII	Региональная
		Andöya	Региональная
	5. Швеция	Bredkälen	Региональная
		Rao	Региональная
	6. Финляндия	Pallas	Региональная
Центральная Европа	7. Германия	Waldhof	Региональная
		Schauinsland	Региональная
		Schmücke	Региональная
		Zingst	Региональная
	8. Чехия	Kosetice	Региональная
	9. Польша	Diabla Gora	Региональная
Восточно-Европейская равнина	10. Россия, Московская область	Приокско-Террасный ГЗ	Региональная

Программой КФМ для стационарной станции установлено измерение суточных концентраций ртути. Анализируемый массив данных за 6 лет – 720 среднесуточных концентраций ртути. Рекогносцировочные измерения среднесуточных концентраций ртути проводились в летний период.

В системе КФМ измерение концентраций ртути проводились следующим образом. Ртуть из атмосферного воздуха в течение суток осаждалась на серебряном сорбенте пробоотборной ловушки. В лаборатории ртуть в процессе десорбции переносилась проходящим через усилительно-измерительный тракт газо-ртутного анализатора потоком воздуха на золотой сорбент. Осевшая ртуть измерялась беспламенным ААС методом. Такой способ позволил проводить концентрирование всех форм газообразной ртути из исходного объема воздуха (1.5 м^3) более, чем в 700 раз, что повышает точность анализа (РД 52.44.591-2015, 2015).

Показатели скорости и направления ветра за 2021 г. получены из архива результатов наблюдений метеорологической станции «Приокско-Террасный заповедник» (станция 5493780). Статистическая обработка результатов выполнена в программе Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Определение форм ртути в атмосферном воздухе и их доли в общем содержании элемента – актуально не только вблизи источников эмиссии, но и

в фоновых районах. Формы ртути различаются по своим физико-химическим свойствам, что оказывает влияние на их поведение в атмосфере и на механизмы переноса между средами. В 1990-х годах доля ртути в выбросах, поступающих в атмосферу в виде частиц, оценивалась в 13% (Расуна, Munch, 1991) и 5-6% по оценке (GMA-2018, 2019), а время жизни – в 3-5 дней, что исключает её участие в дальнейшем переносе.

Форма ртути, идентифицируемая, как аэрозольная, образуется в результате сорбции газообразной ртути на атмосферных аэрозольных частицах, в особенности на частицах сажи (Lindqvist et al., 1991). Ртуть становится нереклаксационноспособной, выводится из атмосферы с аэрозолем в процессе сухого осаждения или вымывания осадками, поступает в другие природные среды (Seigneur et al., 1996).

По данным, полученным в фоновых районах мира в 1980-х годах (Петрухин и др., 1986), аэрозольная ртуть от общего содержания элемента в воздухе составляла 5.5% в зарубежной Европе, 7.4% на Европейской Чasti России, 2.25% в Северной Америке, 6.6% в Северной части Атлантики. В фоновых районах России в районе оз. Байкал в 1996 г. оценки были существенно ниже: в летний период – 0.68-0.86%, в зимний – 1.46-1.8% (Leermakers et al., 1996), что дает среднегодовое значение 1.2%. В 2016-2017 гг. в акватории оз. Байкал среднегодовая оценка доли аэрозольной ртути составила 0.7% (Машьянов и др., 2022).

На станциях ЕМЕП в 5 странах Европы в 2011-2015 гг. и в 2021 г. одновременно измерялись концентрации общей газообразной и аэрозольной ртути. Измерения проводились в Великобритании – 2 года, в Финляндии, – 4 года, в Швеции – 6 лет, в Германии и Чехии – 3 года, что позволило рассчитать современные среднегодовые оценки вклада аэрозольной формы в общее содержание ртути в приземной атмосфере в различных районах Европы.

Расчеты показали, что доля аэрозольной ртути в фоновых районах Северной и Центральной Европы значительно ниже 1% её общего содержания в атмосфере и изменяется год от года в узких стабильных во времени диапазонах: в Великобритании, Финляндии, Чехии от 0.1% до 0.19%, в Германии от 0.43% до 0.48%. Менее стабильна аэрозольная составляющая в фоновых районах Швеции – 0.09-0.56%, что подтверждает заметную неоднородность аэрозольной ртути в пространстве.

Сравнение полученных современных оценок с оценками 80-90-х годов свидетельствует о постепенном снижении доли аэрозольной ртути в атмосфере. Можно предположить, что в соответствии с принятыми международными экологическими решениями в Европе произошло уменьшение массы аэрозольных частиц антропогенного происхождения в целом. Об этом свидетельствует значительное снижение, например, концентраций аэрозолей свинца, кадмия в атмосфере Европы (Бурцева, Конькова, 2016). Кроме того, современные методические и технические возможности позволяют проводить более точные измерения различных форм ртути. Таким образом, незначительный вклад аэрозольной формы в общее содержание ртути в атмосферном воздухе фоновых районов Европы подтверждает доминирующую позицию

газообразной формы, концентрации которой являются основным показателем фонового загрязнения атмосферы ртутью.

В 80-90-е годы в качестве «фоновых» рассматривались, главным образом, арктические районы и акватории морей и океанов, куда ртуть антропогенного происхождения поступает в результате дальнего переноса с наибольшей вероятностью. Наиболее интенсивно измерения концентраций общей газообразной ртути проводились в Арктике. Были получены следующие оценки: 0.47-1.6 нг/м³ – в акватории Баренцева моря, 0.37-0.97 нг/м³ – Карского, 0.2-1.9 нг/м³ – на п-ове Таймыр, 0.75-2.52 нг/м³ – на о. Шпицберген, 0.8-1.8 нг/м³ – на побережье Норвегии, 0.03-2.5 нг/м³ – на северном побережье Канады (Бурцева и др., 1998).

В 2001-2011 гг. на побережье Карского моря вблизи границы Европы и Азии, по данным долговременного мониторинга, среднегодовые концентрации составляли 1.32-1.79 нг/м³ (Панкратов и др., 2013). В 2010-2013 годах были выполнены измерения газообразной ртути в приводном слое атмосферы над дальневосточными морями – Беринговом, Охотским, Японским и в северо-западной части Тихого океана. Концентрации ртути изменялись с юга на север и с запада на восток от 0.3 до 5.1 нг/м³. Среднее значение составило 1.5±0.5 нг/м³ (Калинчук, 2015).

Принимая во внимание близость значений приведенных концентраций и учитывая районы их измерений, можно констатировать, что они характеризуют глобальный фоновый уровень содержания ртути в приземном слое атмосферного воздуха. Среднее значение для северного полушария по мировым данным оценивается в 1.5-1.7 нг/м³ (Lindberg et al., 2007).

Фоновое загрязнение ртутью атмосферного воздуха в континентальной части Европы и в двух арктических районах за период 2011-2015 гг. и 2021 г. были охарактеризованы средними значениями концентраций общей газообразной ртути в атмосферном воздухе (рис. 1) и показатели вариабельности исходных данных (рис. 2). Средние значения концентраций для каждой из стран-участниц программ ЕМЕП и КФМ рассчитывались по совокупному массиву данных, полученных на фоновых станциях (табл. 1), коэффициенты вариации – по годовым массивам исходных данных.

Сравнение современных средних оценок с аналогичными оценками, полученными в предшествующие периоды, показывает, что глобальный фоновый уровень концентраций ртути в приземном воздухе в северном полушарии продолжает сохраняться в диапазоне 1.5-1.7 нг/м³ (Гренландия, о. Шпицберген, рис. 1). Средние фоновые концентрации в западном континентальном секторе рассматриваемого европейского региона практически однородны в пространстве и сравнимы с оценками глобального фона. На территориях Великобритании, Швеции, Финляндии и Польши наблюдается небольшое понижение относительно глобального уровня. Концентрации ртути в центральной части Восточно-Европейской равнины (в Приокско-Террасном заповеднике) почти в 2 раза превышают глобальный уровень в заповедных территориях.

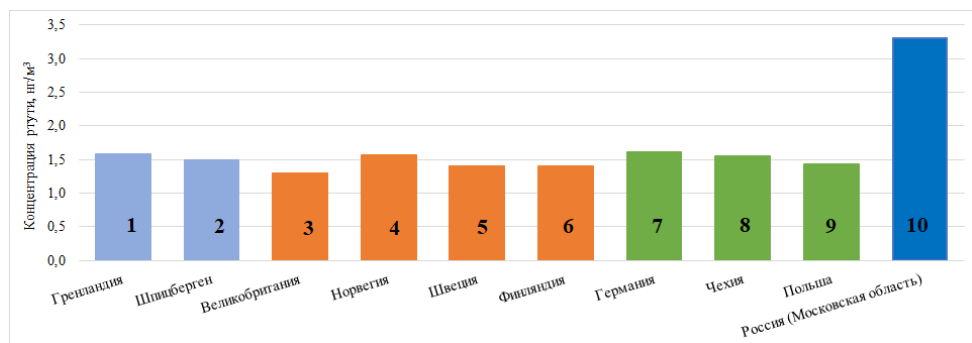


Рисунок 1. Средние за период 2011-2015 гг. и 2021 г. концентрации ртути в атмосферном воздухе в районах Арктики (1, 2), Северной (3-6), Центральной (7-9) и Восточной частей Европы (10)

Figure 1. Average mercury concentrations in air for the period 2011-2015, 2021 in the Arctic (1, 2), Northern (3-6), Central (7-9) and Eastern parts of Europe (10)

Изменчивость разовых концентраций в годовых циклах периода 2011-2021 гг., оцениваемая коэффициентом вариации ниже 20% (рис. 2), подтверждает статичность состояния регионального фоновое загрязнения атмосферы ртутью в Северной Европе, включающей Великобританию и Скандинавские страны. Колебания разовых концентраций ртути в атмосфере фоновых районов стран Центральной Европы происходят в более широком диапазоне, чем в странах Северной Европы. На территории Чехии коэффициент вариации разовых фоновых концентраций год от года изменяется от 0.1 до 0.9. В Приокско-Тerrasном заповеднике диапазон изменчивости за весь представленный период значительно шире (рис. 2).

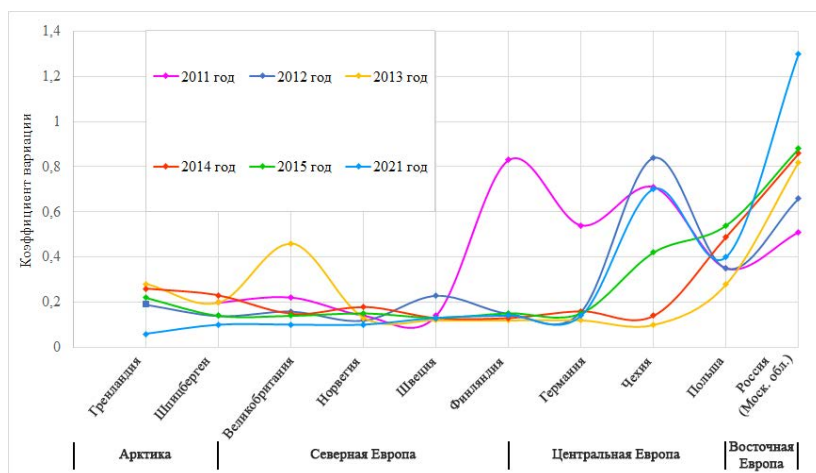


Рисунок 2. Коэффициенты вариаций разовых концентраций ртути в годовых циклах в фоновых районах Арктики, Северной, Центральной и Восточной Европы

Figure 2. Coefficients of variation of single mercury concentrations in annual cycles in the background regions of the Arctic, Northern, Central and Eastern Europe

Заметна дифференциация территорий в географическом пространстве и по значениям максимальных разовых концентраций в годовом цикле (табл. 2). На побережье Гренландии (западное полушарие) максимальные разовые концентрации примерно в 2 раза выше, чем на о. Шпицберген, В Северной и Центральной Европе – в своем большинстве не выходят за границы интервала 1.5-3.2 нг/м³. В центре Восточно-Европейской равнины максимальные разовые значения значительно выше, чем в Северной и Центральной Европе и сопоставимы с экстремальными значениями, наблюдавшимися в Великобритании в 2012 г., в Чехии в 2015 г., а также на побережье Карского моря в 2007 г. (Панкратов и др., 2013). При этом на территориях стран, независимо от региона, максимально разовые концентрации стабильны год от года, за исключением Великобритании и Чехии.

Таблица 2. Максимальные разовые концентрации ртути в атмосферном воздухе стран Арктики, Северной, Центральной и Восточной Европы

Table 2. Maximum one-time concentrations of mercury in the atmospheric air of the countries of Northern, Central and Eastern Europe

Регион	Территория	Число станций	Концентрации, нг/м ³					
			2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2021 г.
Арктика	Гренландия	1	-	4.13	4.8	4.48	5.0	1.5
	о. Шпицберген	1	2.9	2.4	2.4	2.4	2.46	-
Северная Европа	Великобритания	2	2.2	18.4	1.5	-	4.16	1.7
	Норвегия	2	4.3	2.9	2.3	3.13	2.79	1.5
	Швеция	2	3.2	2.2	2.0	2.1	2.8	-
	Финляндия	1	2.8	-	1.7	1.7	2.2	2.2
Центральная Европа	Германия	4	3.0	3.2	3.1	3.0	2.7	2.0
	Чехия	1	5.7	3.0	-	-	13.9	-
	Польша	1	3.0	3.4	2.8	3.0	3.8	-
Восточная Европа	Московская обл. ПТГЗ*	1	13.7	16.0	16.0	18.0	14.0	15.1

Примечание: * – Приокско-Тerrasный государственный заповедник

Особенности изменчивости фоновых концентраций в географическом пространстве демонстрируют результаты измерений, выполненных одновременно в летние месяцы 2012, 2014 и 2015 гг. на станциях ЕМЕП, КФМ и при рекогносцировочных обследованиях Волжско-Камского заповедника и Национального Парка «Смоленское Поозерье» (рис. 3). На фоне устойчивого, практически однородного уровня концентраций в Арктике, Северной и Центральной Европе, пространственной неоднородностью концентраций ртути выделяется Восточно-Европейская равнина. На западе и востоке равнины в 2012 и 2015 гг. концентрации ртути были близки к оценке глобального фона, в центральной части наблюдалось значительное превышение глобального фона в 2012 и 2014 гг. и на востоке в 2014 г.

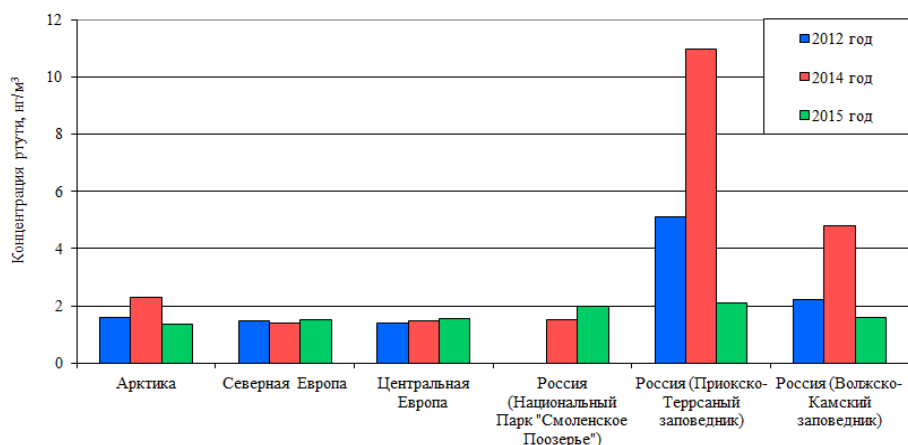


Рисунок 3. Концентрации ртути, измеренные одновременно в летние месяцы 2012, 2014 и 2015 гг. на станциях ЕМЕП и КФМ в Арктике, Северной и Центральной Европе

Figure 3. Mercury concentrations measured simultaneously in the summer months of 2012, 2014 and 2015 at EMEP, CBM Arctic, Northern, Central and Eastern Europe

Отметим, что также наблюдалось явное межрегиональное различие в сезонной изменчивости концентраций общей ртути (рис. 4). В Северной и Центральной Европе различие концентраций в холодное и теплое полугодие выражено слабо. В Арктике фоновые концентрации в теплое полугодие незначительно выше, чем в холодное и существенно выше на территории Восточно-Европейской равнины.

Анализ внутригодовой изменчивости среднемесячных концентраций ртути, осредненный за весь рассматриваемый период, на территории Приокско-Террасного заповедника показал чётко выраженную сезонность. Самые низкие концентрации, совпадающие с глобальными оценками, характерны для холодного периода – январь, февраль, ноябрь и декабрь – $1.8-2.0 \text{ нг/м}^3$. Концентрации постепенно возрастают до 5.6 нг/м^3 в течение весны, сохраняются в интервале $4-6.2 \text{ нг/м}^3$ в летние месяцы – июнь, июль, август, далее постепенно возвращаются на уровень глобальных оценок.

Совместное рассмотрение преимущественного направления приземного ветра в каждый месяц 2021 года и среднемесячных концентраций ртути показало следующее. С июня по сентябрь преимущественное направление ветра северное, то есть от мегаполиса (Москва, 83 км) и г. Подольска в сторону Приокско-Террасного заповедника, средняя за этот период концентрация составила 2.1 нг/м^3 . Западные ветры, направленные от г. Серпухова (12 км) к Приокско-Террасному заповеднику характерны для февраля, марта, октября и ноября, средняя концентрация ртути – 1.5 нг/м^3 . В январе, апреле, мае, октябре и ноябре преимущественно ветры южной четверти – от г. Тулы (85 км) к Приокско-Террасному заповеднику, средняя концентрация ртути – 0.83 нг/м^3 . Внутригодовая изменчивость концентраций ртути в воздухе Приокско-Террасного заповедника в 2021 г. явно совпадает с описанной выше внутригодо-

вой изменчивостью концентраций, средних за весь рассматриваемый период. Из этих оценок следует, что направленность приземного ветра оказывает существенное влияние на содержание ртути в воздухе на территории Приокско-Террасного заповедника. Концентрация ртути возрастает в наибольшей степени при ветрах со стороны г. Подольска и мегаполиса, то есть при ветрах, характерных для теплого периода года, что можно в значительной степени объяснить влиянием московской городской агломерации.

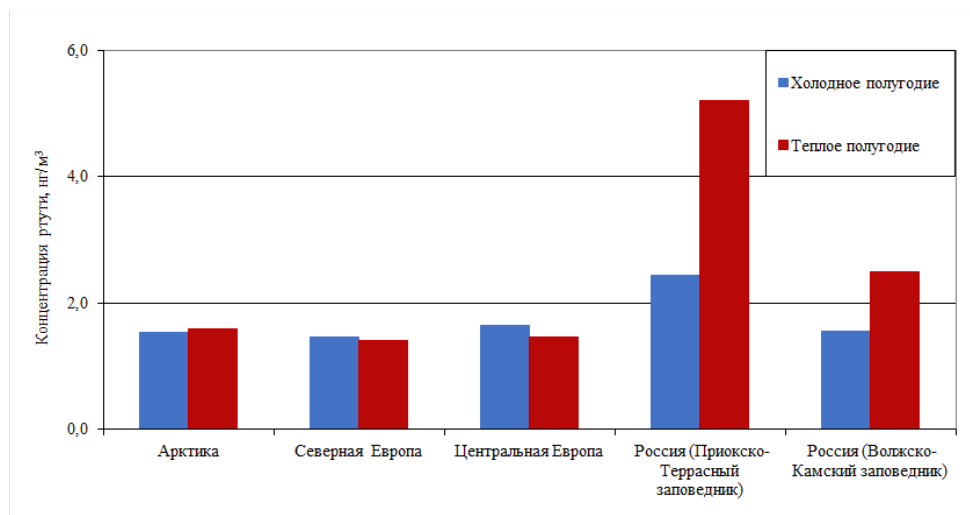


Рисунок 4. Средние за период 2011-2015 концентрации ртути в атмосферном воздухе в холодное и теплое полугодие в регионах Европы

Figure 4. Average mercury concentrations in atmospheric air in the cold and warm half-years in European regions for the period 2011-2015

Таким образом, результаты анализа современных фактических данных показали, что при однородности средних оценок, характеризующих фоновое содержание ртути в атмосфере на большей части европейской территории, существуют индивидуальные, мелкомасштабные особенности изменчивости разовых концентраций элемента во времени и средних концентраций в географическом пространстве.

Необходимо отметить, что рассматриваемые регионы (табл. 1) находятся в разных природно-географических условиях, формирующих климатические особенности территорий. А территории рассматриваемых стран имеют различную плотность размещения и мощность источников антропогенной эмиссии ртути в атмосферу, то есть различную антропогенную нагрузку. Северная Европа омывается Атлантическим и Северным Ледовитым океанами, с юга – Балтийским морем, что формирует климат региона умеренный и более мягкий морской со сглаженной сезонностью на западе, и субарктический на северо-востоке. В Центральной Европе в Германии климат умеренный и морской, в Польше и Чехии – умеренный, в центре Восточно-Европейской равнины – континентальный с четко выраженными сезонами года.

Поступление ртути из океана, составляющее основную долю мировой природной эмиссии (Pirrone et al., 2010), является мощным фактором стабили-

зации содержания ртути в атмосфере, способствующим сокращению амплитуды колебаний разовых концентраций, сглаживанию сезонной и пространственной их изменчивости в фоновых районах стран Северной Европы.

На внутриконтинентальных территориях Европы стабилизирующая роль океанического источника эмиссии ртути сокращается. Возрастает роль местных источников эмиссии ртути и таких природно-географических факторов, как климат, определяющий особенности метеорологических процессов, рельеф местности, природные ресурсы территории и другие. Под их влиянием формируются особенности фонового загрязнения ртутью атмосферы на конкретных территориях, что и продемонстрировали результаты анализа данных, изложенные выше.

Выводы

Сравнительный анализ данных мониторинга содержания ртути в приземном воздухе в фоновых районах части европейской территории за период 2011-2015 и 2021 гг. с идентичными данными, полученными в 1980-х годах, выявил следующие особенности современного состояния фонового загрязнения атмосферы ртутью в странах Северной, Центральной Европы (ЕМЕП) и в России на Восточно-Европейской равнине (КФМ).

На изменчивость регионального фонового загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха ртутью оказывают влияние природно-географические особенности территорий стран. Континентальный климат, с четко выраженными сезонами года, расширяет границы изменчивости концентраций ртути в атмосфере центральной части Восточно-Европейской равнины.

Вклад аэрозольной ртути в общее её содержание в атмосфере фоновых районов Европы за более чем 30-летний период, постепенно снижаясь, достиг уровня 0.1-0.6%, что подтверждает доминирующую позицию газообразной формы для оценки фонового загрязнения атмосферы ртутью.

Средние оценки глобального фонового уровня концентраций газообразной ртути в приземном воздухе в северном полушарии в арктических районах (Гренландия, о. Шпицберген) в настоящее время, как и в 1980-х годах, сохраняются на уровне 1.5-1.7 нг/м³. Средние концентрации в фоновых районах стран Северной и Центральной Европы практически однородны в пространстве, сравнимы с оценками глобального фона и стабильны во времени.

На Восточно-Европейской равнине явно выражена пространственная неоднородность. На западе, в Национальном Парке «Смоленское Поозерье» и на востоке в заповедной зоне Татарстана концентрации близки концентрациям, наблюдаемым в Северной и Центральной Европе, в центре (заповедная территория в Московской области) средние концентрации почти в 2 раза выше. Здесь рост концентраций происходит при характерных для теплого периода года северных ветрах.

Годовые максимальные концентрации, в своем большинстве, не выходят за границы интервала 1.5-3.2 нг/м³ в фоновых районах стран Северной и Цен-

тральной Европы. Аналогичные оценки в центре Восточно-Европейской равнины составляют 13.7-18.0 нг/м³ и характеризуют возможный верхний предел концентраций в фоновых районах плотно населенных территорий, в которых заповедные зоны расположены на расстоянии не более 50 км от мегаполисов.

Сезонная изменчивость содержания ртути в атмосфере фоновых районов различается в географическом пространстве. В странах Северной и Центральной Европы концентрации ртути в холодное и теплое полугодие отличаются незначительно. В центре и на востоке Восточно-Европейской равнины закономерность ярко выраженная: концентрации ртути в теплое полугодие в 2 раза выше, чем в холодное.

На состояние регионального фонового загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха ртутью оказывают влияние природно-географические особенности территорий стран. Стабилизирующее влияние Атлантического океана особенно заметно в странах Северной Европы. Континентальный климат, с четко выраженными сезонами года, расширяет границы изменчивости концентраций ртути в атмосфере центральной части Восточно-Европейской равнины.

В целом в рассмотренном регионе Европы современные фоновые концентрации ртути в атмосферном воздухе крайне низкие, составляют в среднем не более 1.2% нормы ПДК, принятой в России (300 нг/м³). На территориях стран, независимо от региона, фоновые концентрации ртути стабильны в течение длительного времени.

Снижение антропогенной эмиссии элемента в атмосферу в результате принятия ограничительных решений было в Европе и Северной Америке, но при этом в Азии, Африке и Латинской Америке отмечается рост. Учитывая глобальный характер распространения ртути, можно сказать, что снижение уровней ртути за счёт сокращения выбросов в одних регионах компенсируется ростом ртути за счёт роста выбросов в других регионах (межконтинентальный перенос). Однако это не изменило уровень фоновых концентраций ртути в воздухе, как в глобальном, так и в региональном масштабе, что говорит о решающей роли природных источников в его формировании.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы 4.5. «Развитие и модернизация методов и технологий комплексного фонового мониторинга и комплексной оценки состояния и загрязнения окружающей среды РФ и ее динамики (по интегрированным результатам сетей мониторинга Росгидромета)». Регистрационный номер 125031703848-8.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за просмотр рукописи и сделанные ценные замечания, которые были приняты и учтены в тексте.

Список литературы

Бурцева, Л.В., Конькова, Е.С. (2016) Свинец и кадмий в атмосфере и осадках в фоновых районах восточно-европейского региона, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXVII, № 2, с. 59-70.

Бурцева, Л.В., Черханов, Ю.П., Голубева, Н.И. (1998) Ртуть в приземном воздухе Арктики, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 57- 64.

Бурцева, Л.В., Жердев, К.А., Алехина М.А. (2021) Массовые концентрации ртути, свинца и кадмия в атмосферном воздухе в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике в 2000-2005 гг., *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620925*.

Бурцева, Л.В. (2022) Массовые концентрации ртути, свинца и кадмия в атмосферном воздухе в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике в 2006-2010 гг., *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620925*.

Громов, С.А., Парамонов, С.Г. (2015) Современное состояние и перспективы развития комплексного фонового мониторинга загрязнения природной среды, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. XXVI, № 1, с. 205-221.

Калинчук, В.В. (2015) Особенности пространственно-временного распределения атомарной ртути в приземном слое атмосферы над дальневосточными морями России (по результатам исследований за 2010-2013 гг.), *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты*, Труды Международного симпозиума, Новосибирск, 2015 г., с 173-177.

Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (1979) URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml.

Конюхова, И. (2017) *Глобальное соглашение по ртути – конвенция Минамата*, 20 с., URL: <https://mineconom.gov.kg/froala/uploads/file/cd4a24aec4dfbe-3350597b24b1e97d4d403a6059.pdf>.

Машьянов, Н.Р., Погарев, С.Е., Шолупов, С.Е., Рыжов, В.В., Оболкин, В.А., Ходжер, Т.В., Потемкин, В.Л., Моложникова, Е.В., Калинчук, В.В (2022) Мониторинг Атмосферной Ртути в Районе Озера Байкал (2011-2021), *Сборник докладов третьего международного симпозиума «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты»*, с. 126-129, URL: <http://www.limnolfwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/955>.

Панкратов, Ф.Ф., Конаплёв, А.В., Махура, А., Кац, О.В. (2013) Анализ данных долговременного мониторинга концентраций атмосферной ртути и метеорологических величин на полярной станции Амдерма, *Метеорология и гидрология*, № 13, с. 56-67.

Петрухин, В.А., Андрианова, Г.А., Бурцева, Л.В., Виженский, В.А., Лапенко, Л.А., Юшкан, Е.И. (1986) Фоновое содержание свинца, ртути, мышьяка,

кадмия, в природных средах (по мировым данным), сообщение 3, *Мониторинг фонового загрязнения природных сред*, вып. 3, Л., Гидрометеиздат, с. 3-27.

Программа мониторинга и оценки Арктики (1991) URL: <https://www.amap.no/>.

РД 52.44.591-2015 (2015) *Массовая концентрация ртути в атмосферном воздухе. Методика измерения методом атомно-абсорбционной спектроскопии «холодного пара»*, ООО «Принт – 2», г. Ижевск.

Янин, Е.П. (2004а) Эмиссия ртути в окружающую среду при производстве цемента в России, *Экологическая экспертиза*, № 4, с. 31-42.

Янин, Е.П. (2004б) Эмиссия ртути в атмосферу российскими предприятиями черной металлургии, *Экологическая экспертиза*, № 5, с. 101-108.

Штайнер, А. (2013) *Глобальная оценка ртути 2013. Источники, эмиссии, реализации и транспорт в окружающей среде*, Доклад ЮНЕП в Найроби 2013 г., URL: <https://nparso.ru/index.php/informatsiya/nashi-publikatsii/34-yunep-podgotovila-obnovlenie-globalnoj-otsenki-rtuti-global-mercury-assessment-2013-sources-emissions-releases-and-environmental-transport>.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2014) *Heavy metals and POP measurements, 2012*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2017) *Heavy metals and POP measurements, 2015*, EMEP/CCC, 03/2017, Kjeller, NILU.

Aas, W., Breivik, K. (2013) *Heavy metals and POP measurements, 2011*, EMEP/CCC, 04/2013, Kjeller, NILU.

Aas, W., Nizzetto, P.B. (2015) *Heavy metals and POP measurements, 2013*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Pfaffhuber, K.A., Bohlin-Nizzetto, P. (2016) *Heavy metals and POP measurements, 2014*, EMEP/CCC, 04/2016, Kjeller, NILU.

Brosset, C. (1987) The behavior of mercury in the physical environment, *Water, air and soil pollution*, vol. 34, pp. 145-166.

EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis (2001) EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norway, NILU, 301 p.

Gonzalez-Raymat, H., Liu, G., Liriano, C., Li, Ya., Yin, Yo., Shi, Yi., Jiang, G., Cai, Yo (2017) Elemental mercury: Its unique properties affect its behavior and fate in the environment, *Environmental Pollution*, vol. 229, pp. 69-86, doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.101.

GMA-2018 (2019) *Global mercury assessment 2018*, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland.

Heavy metal and POP transboundary pollution in 2015. Concentration and deposition maps, source-receptor matrices, ecosystem-specific deposition and evaluation of model performance (2017) EMEP/MSC-E Supplementary material to EMEP Status Reports 2/2017 and 3/2017.

Leermakers, M., Menleman, C., Baeyens, W. (1996) Mercury Distribution and Fluxes in Lake Baikal, *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*, in Baeyens, W.W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (eds.), Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publishers, NATO ASI, ser. 2, vol. 21, pp. 303-315.

Lindberg, S., Bullock, R., Ebinghaus, R., Engstrom, D., Feng, X., Fitzgerald, W., Pirrone, N., Prestbo, E., Seigneur, C. (2007) A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition, *Ambio*, no. 36(1), pp. 19-32.

Lindqvist, O., Johanson, K., Aastrup, M., Anderson, A., Bringmark, T., Hovsenlus, G., Hakanson, L., Mtl, M., Timm, B. (1991) Mercury in the Swedish environment – research on causes consequences and corrective methods, *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 55, pp. 1-261.

Pacyna, J.M., Munch, J. (1991) Anthropogenic mercury emission in Europe, *Water, Air and Pollution*, vol. 56, pp. 51-61.

Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A.B., Stracher, G.B., Streets, D.G. (2010) Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 34(1), pp. 49-93, doi:10.5194/acpd-10-4719-2010, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-009-0004-9>.

Seigneur, C., Abeck, H., Reinhard, M. (1996) The effect of particulate absorption on mercury atmospheric chemistry, *Fourth International Conference on Mercury as a Global Pollutant. 1996*, Book of abstracts, Hamburg, p. 439.

References

Burtseva, L.V., Konkova, E.S. (2016) Svinets i kadmiy v atmosfere i osadkakh v fonovykh rayonakh vostochno-yevropeyskogo regiona [Lead and cadmium in the atmosphere and precipitation in background areas of the Eastern European region], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVII, no. 2, pp. 59-70.

Burtseva, L.V., Cherkhanov, Yu.P., Golubeva, N.I. (1998) Rtut' v prizemnom vozdukh Arktiki [Mercury in the surface air of the Arctic], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 57-64.

Burtseva, L.V., Zherdev, K.A., Alekhina M.A. (2021) Mass concentrations of mercury, lead and cadmium in the atmospheric air in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in 2000-2005 [Massovyie kontsentratsii rtuti, svintsa i kadmiya v atmosfernom vozdukh v Prioksko-Terrasnom biosfernom zapovednike v 2000-2005 gg.], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2022620925* [Certificate of state registration of the database No. 2022620925].

Burtseva, L.V. (2022) Massovyie kontsentratsii rtuti, svintsa i kadmiya v atmosfernom vozdukh v Prioksko-Terrasnom biosfernom zapovednike v 2006-

2010 гг. [Mass concentrations of mercury, lead and cadmium in the atmospheric air in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in 2006-2010], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2022620925* [Certificate of state registration of the database No. 2022620925].

Gromov, S.A., Paramonov, S.G. (2015) *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya kompleksnogo fonovogo monitoringa zagryazneniya prirodnoy sredy* [Current state and prospects for the development of integrated background monitoring of environmental pollution], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVI, no. 1, pp. 205-221.

Kalinchuk, V.V. (2015) *Osobennosti prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya atomarnoy rtuti v privodnom sloye atmosfery nad dal'nevostochnymi moryami Rossii (po rezul'tatam issledovaniy za 2010-2013 gg.)* [Features of the spatio-temporal distribution of atomic mercury in the atmospheric surface layer over the Far Eastern seas of Russia (based on the results of studies for 2010-2013)], *Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskiye aspekty, Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma, Novosibirsk, 2015 g.* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects, Proceedings of the International Symposium, Novosibirsk, 2015], Novosibirsk, Russia, pp. 173-177.

Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (1979) URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml.

Konyukhova, I. (2017) *Global'noye soglasheniye po rtuti – konventsia Minamata* [Global Agreement on Mercury – Minamata Convention], 20 p., URL: <https://mineconom.gov.kg/froala/uploads/file/cd4a24aec4dfbe3350597b24b1e97d4d403a6059.pdf>.

Mashyanov, N.R., Pogarev, S.E., Sholupov, S.E., Ryzhov, V.V., Obolkin, V.A., Khodzher, T.V., Potemkin, V.L., Molozhnikova, E.V., Kalinchuk, V.V (2022) *Monitoring Atmosfernoy Rtuti v Rayone Oзера Baykal (2011-2021)* [Monitoring of Atmospheric Mercury in the Lake Baikal Region (2011-2021)], *Sbornik dokladov tret'yego mezhdunarodnogo simpoziuma «Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskiye aspekty»* [Proceedings of the Third International Symposium "Mercury in the Biosphere: Ecological and Geochemical Aspects"], pp. 126-129, URL: <http://www.limnolwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/955>.

Pankratov, F.F., Konaplev, A.V., Makhura, A., Katz, O.V. (2013) *Analiz dannykh dolgovremennogo monitoringa kontsentratsiy atmosfernoy rtuti i meteorologicheskikh velichin na polyarnoy stantsii Amderma* [Analysis of long-term monitoring data of atmospheric mercury concentrations and meteorological variables at the Amderma polar station], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 13, pp. 56-67.

Petrukhin, V.A., Andrianova, G.A., Burtseva, L.V., Vizhensky, V.A., Lapenko, L.A., Yushkan, E.I. (1986) *Fonovoye sodержaniye svintsa, rtuti, mysh'yaka, kadmiya, v prirodnnykh sredakh (po mirovym dannym), coobshcheniye 3* [Background content of lead, mercury, arsenic, cadmium in natural environments (according to world data), message 3], *Monitoring fonovogo zagryazneniya*

prirodnnykh sred [Monitoring of background pollution of natural environments], issue 3, Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia pp. 3-27.

Программа мониторинга и оценки Арктики (1991) URL: <https://www.amap.no/>.

RD 52.44.591-2015 (2015) *Massovaya kontsentratsiya rtuti v atmosfernom vozdukh. Metodika izmereniya metodom atomno-absorbtsionnoy spektrometrii «kholodnogo para»* [Mass concentration of mercury in atmospheric air. Methodology for measuring by the method of atomic absorption spectrometry of "cold steam"], Print-2 LLC, Izhevsk, Russia.

Yanin, E.P. (2004a) Emissiya rtuti v okruzhayushchuyu sredu pri proizvodstve tsementa v Rossii [Mercury emissions into the environment during cement production in Russia], *Ekologicheskaya ekspertiza*, no. 4, pp. 31-42.

Yanin, E.P. (2004b) Emissiya rtuti v atmosferu rossiyskimi predpriyatiyami chernoy metallurgii [Mercury emissions into the atmosphere by Russian ferrous metallurgy enterprises], *Ekologicheskaya ekspertiza*, no. 5, pp. 101-108.

Steiner, A. (2013) *Global'naya otsenka rtuti 2013: Istochniki, emissii, realizatsii i transport v okruzhayushchey srede* [Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport], Doklad YUNEP v Nayrobi 2013 g [UNEP Nairobi Report 2013], URL: <https://nparso.ru/index.php/informatsiya/nashi-publikatsii/34-yunep-podgotovila-obnovlenie-globalnoj-otsenki-rtuti-global-mercury-assessment-2013-sources-emissions-releases-and-environmental-transport>.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2014) *Heavy metals and POP measurements, 2012*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Bohlin-Nizzetto, P. (2017) *Heavy metals and POP measurements, 2015*, EMEP/CCC, 03/2017, Kjeller, NILU.

Aas, W., Breivik, K. (2013) *Heavy metals and POP measurements, 2011*, EMEP/CCC, 04/2013, Kjeller, NILU.

Aas, W., Nizzetto, P.B. (2015) *Heavy metals and POP measurements, 2013*, EMEP/CCC, 04/2015, Kjeller, NILU.

Aas, W., Pfaffhuber, K.A., Bohlin-Nizzetto, P. (2016) *Heavy metals and POP measurements, 2014*, EMEP/CCC, 04/2016, Kjeller, NILU.

Brosset, C. (1987) The behavior of mercury in the physical environment, *Water, air and soil pollution*, vol. 34, pp. 145-166.

EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis (2001) EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001, Norway, NILU, 301 p.

Gonzalez-Raymat, H., Liu, G., Liriano, C., Li, Ya., Yin, Yo., Shi, Yi., Jiang, G., Cai, Yo (2017) Elemental mercury. Its unique properties affect its behavior and fate in the environment, *Environmental Pollution*, vol. 229, pp. 69-86, doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.101.

GMA-2018 (2019) *Global mercury assessment 2018*, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland.

Heavy metal and POP transboundary pollution in 2015: Concentration and deposition maps, source-receptor matrices, ecosystem-specific deposition and evaluation of model performance" (2017) EMEP/MSC-E Supplementary material to EMEP Status Reports 2/2017 and 3/2017.

Leermakers, M., Menleman, C., Baeyens, W. (1996) Mercury Distribution and Fluxes in Lake Baikal, *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*, in Baeyens, W.W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (eds.), Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publishers, NATO ASI, ser. 2, vol. 21, pp. 303-315.

Lindberg, S., Bullock, R., Ebinghaus, R., Engstrom, D., Feng, X., Fitzgerald, W., Pirrone, N., Prestbo, E., Seigneur, C. (2007) A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition, *Ambio*, no. 36(1), pp. 19-32.

Lindqvist, O., Johanson, K., Aastrup, M., Anderson, A., Bringmark, T., Hovsenlus, G., Hakanson, L., Mtil, M., Timm, B. (1991) Mercury in the Swedish environment – research on causes consequences and corrective methods, *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 55, pp. 1-261.

Pacyna, J.M., Munch, J. (1991) Anthropogenic mercury emission in Europe, *Water, Air and Pollution*, vol. 56, pp. 51-61.

Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A.B., Stracher, G.B., Streets, D.G. (2010) Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 34(1), pp. 49-93, doi:10.5194/acpd-10-4719-2010, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-009-0004-9>.

Seigneur, C., Abeck, H., Reinhard, M. (1996) The effect of particulate absorption on mercury atmospheric chemistry, *Fourth International Conference on Mercury as a Global Pollutant. 1996*, Book of abstracts, Hamburg, p. 439.

Статья поступила в редакцию (Received): 25.03.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 25.06.2025.

Для цитирования / For citation:

Бурцева, Л.В., Александрова, М.С., Позднякова, Е.А., Брускина, И.М. (2025) Ртуть в атмосферном воздухе в фоновых районах стран Северной, Центральной и Восточной Европы, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVI, № 3-4, с. 64-83, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-64-83.

Burtseva, L.V., Aleksandrova, M.S., Pozdnyakova, E.A., Bruskina, I.M. (2025) Mercury in the atmospheric air in the background areas of the Nordic countries, Central and Eastern Europe, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*. v. XXXVI, no. 3-4, pp. 64-83, doi:10.24412/2782-3237-2025-3-4-64-83.