

УДК 551.510.42+551.577

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИЙ И ПОТОКОВ РТУТИ, ПОСТУПАЮЩИХ ИЗ АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИЮ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Л.В. Шоль¹, С.С. Эйрих², Е.Г. Ильина¹¹Алтайский государственный университет, Барнаул, E-mail: lilichkashol661@gmail.com, ilina@chem.asu.ru²Институт водных и экологических проблем, Барнаул, E-mail: steyrikh@gmail.com

Содержание ртути в атмосферных осадках, выпадающих в черте городов Надыма и Салехарда, варьирует в пределах 0,5-63,3 нг/л и 2,7-26,1 нг/л соответственно. Средневзвешенная концентрация ртути в атмосферных осадках холодного периода в г. Салехард в два раза меньше, чем в г. Надым. Средневзвешенная годовая концентрация ртути г. Надым сопоставима с величинами, полученными для других урбанизированных регионов мира, хотя по сравнению с удаленными местами Арктики (Аляска) она значительно выше. Максимальные концентрации ртути в осадках относятся к холодному весеннему периоду, что вероятнее всего, связано с весенним истощением атмосферных концентраций ртути (AMDE). Вклад выпадений в период AMDE в годовое выпадение ртути в 2016-2017 гг. составляет 12,3 %, а в 2017-2018 гг. – 30,4 %. Среднегодовые потоки влажного осаждения ртути для г. Надым (за 3-х летний период наблюдений) существенно ниже ее потоков осаждения в других регионах (США, Европы и Китая), но сопоставим со среднегодовыми потоками для удаленных территорий арктической зоны. В холодные периоды года потоки влажного осаждения ртути находятся на близком уровне: 0,64-0,65 мкг/м², тогда как в теплый период они изменяются существенно: 0,47-1,84 мкг/м². Резкое повышение поступления ртути, наблюдаемое в теплый период 2018 г., может объясняться ее региональным поступлением при таянии вечной мерзлоты, обусловленном высокими температурами в данный период (2018 г. был вторым по температуре после 1936 г., причем увеличение мощности сезонно-талого слоя в районе Надыма составило 37 см по сравнению с 2017 г.).

Ключевые слова: ртуть, Арктика, атмосферные осадки, средневзвешенные концентрации, потоки осаждения, AMDE, таяние мерзлоты.

DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15909

Дата поступления 3.12.2020

Ртуть является глобальным загрязнителем окружающей среды, поступая как от антропогенной деятельности человека, так и от природных источников. Большая часть ртути, загрязняющей Арктику, является результатом переноса по воздуху и океанским путям из источников, находящихся за пределами Арктики [1-2]. Ртуть, попадая в окружающую среду, проявляет способность к биоаккумуляции и биомагнификации. После ее проникновения в арктические пищевые цепи, Hg накапливается в тка-

нях живых организмов, тем самым, оказывая на них токсичное воздействие.

В атмосфере Hg существует в трех формах: атомарная (Hg⁰), реактивная газообразная (RGM) и сорбированная на частицах (Hg_p). Атомарная ртуть устойчива в атмосфере долгое время (до года и более) и может транспортироваться на большие расстояния, тогда как реактивная газообразная и сорбированная на частицах ионная ртуть менее устойчивы в атмосфере (от нескольких часов до нескольких дней) и распространяются на расстояния до сотен километров [3].

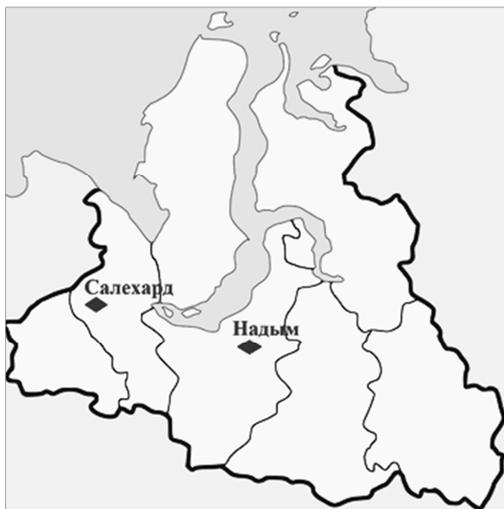


Рис. 1. Геолокация точек отбора проб

Инструментальный анализ

Отбор проб атмосферных осадков (индивидуальные события) проводили сотрудники ГКУ ЯНАО НЦИА в холодный период на станции мониторинга Научного центра изучения Арктики: в г. Надым ($65^{\circ}32'$ с. ш. $72^{\circ}31'$ в. д.) – 40 проб (2016-2019); в г. Салехард ($66^{\circ}32'$ с. ш. $66^{\circ}38'$ в. д.) – 141 проба (2016-2017). Всего было проанализировано и обработано более 100 проб (рис. 1). Синоптические условия в период выпадения атмосферных осадков оценивали на основе метеонаблюдений в непосредственной близости от точек отбора и использовали данные Росгидромета и Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) [4].

Анализ общей ртути в нефiltroванных образцах атмосферных осадков проводился в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН в чистой комнате с использованием очищенной соляной кислоты и воды класса 18MQ. Концентрации общей ртути в нефiltroванных пробах атмосферных осадков определяли методом атомной флуоресценции с использованием анализатора «Mercur DUO Plus» (US EPA 1631: определение ртути в воде посредством окисления, барботирования, улавливания на золотом сорбенте и детекции

атомно-флуоресцентной спектрометрией методом холодного пара) [5]. Предел обнаружения составлял 0,5 нг/л.

Контроль качества осуществлялся в соответствии с методом US EPA 1631 с использованием стандартных растворов ртути (ГСО 8004-93 – СО 8006-93), метода «введено-найдено». Результаты, полученные на анализаторе «Mercur Duo Plus», полностью соответствуют принятым критериям качества метода (табл. 1).

Основные результаты

Территория Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) располагается на севере Западно-Сибирской низменности в трех климатических зонах (арктической, субарктической и умеренной континентальной). Климат определяется наличием многолетней мерзлоты, близостью холодного Карского моря, обилием заливов, рек, болот и озер. Он характеризуется длительным холодным зимним периодом, который начинается в октябре-ноябре и заканчивается в конце мая. Важно отметить, что в данном регионе осадки теплого периода (с мая по сентябрь) преобладают в годовой структуре распределения (по данным ГМС). Отрицательное воздействие на природную среду Надымского района в настоящее время осуществляется, главным образом, со стороны нефтегазового комплекса. Несовершенство технологии добычи нефти и газа обуславливает постоянное сжигание колоссального объема газа на факелах. Кроме того, значительную долю в выбросы вносят объекты теплоэнергетики.

Различия в уровнях атмосферного загрязнения городов Надыма и Салехарда определяются орографическими особенностями местоположения изучаемых территорий и отличиями в высоте облачности, на которой формируются осадки. В Надыме основное количество осадков формируется на высоте свыше 600 м, в Салехарде – ниже 600 м. Вследствие этого вклад антропогенных источников локального и регионального

уровней в общее загрязнение атмосферного воздуха в Салехарде несколько выше, чем в Надыме [6-7]. Результаты определения ртути в атмосферных осадках городов Надым и Салехард, полученные для разных периодов, приведены в таблице 2.

Концентрации ртути в атмосферных осадках изменялись в холодный период от <0,5 нг/л (менее предела обнаружения) до 63,3 нг/л, а в теплый – от 1 до 29,4 нг/л. Минимальные и максимальные концентрации отличаются незначительно между периодами, исключение составляют краткосрочные ее повышения в весенний период. Сравнение средних концентраций в городах Надым и Салехард показало, что они находятся на близком уровне: 6,7 и 7,0 нг/л, соответственно, однако медианные значения отличались почти в два раза. Обычно среднеарифметические концентрации имеют несколько завышенные значения, что связано с непропорциональным увеличением вклада слабых непродолжительных осадков за счет высоких концентраций в них. Сезонное и межгодовое сравнение концентраций Hg в атмосферных осадках представлено на рисунке 2.

Несмотря на наблюдаемое в последние годы на многих мониторинговых станциях США, Канады и Европы снижение концентраций ртути в воздухе и атмосферных выпадениях, которое объясняется сокращением антропогенных выбросов, для арктических регионов подобного устойчивого тренда не выявлено. В высоких северных широтах (выше 60° с.ш.) эти тенденции проявляются более слабо и менее значимо: от –0,9 до +0,1 % в год. Сильные источники эмиссии в Южной и Восточной Азии компенсируют сокращение осаждения ртути в глобальном масштабе [2, 8-13]. В атмосферных осадках г. Надым наблюдается существенное повышение концентраций в 2017-2018 гг. При существующей системе циркуляции воздуха в зимний период осуществляется транспортировка загрязняющих веществ от источников, удаленных на тысячи километров от Арктического региона (из промышленно развитых регионов Европы, Азии и Северной Америки), в летний же период возрастает вклад меридиональных переносов от среднеудаленных и локальных источников загрязнения.

Таблица 1

Критерии качества метода US EPA 1631

Параметры	Методические критерии	Полученные результаты
<i>Начальная точность и степень извлечения (IPR), %</i>		
Начальная точность (RSD)	21	4,7
Степень извлечения (Recovery)	79-121	83,2
<i>Влияние матрицы пробы (MS и MSD)</i>		
Степень извлечения (Recovery)	71-125	97,5
Относительная доля различия (RPD), %	24	2,5

Таблица 2

Уровни содержания ртути в атмосферных осадках городов Надым и Салехард, нг/л

Город	Min	Max	Ср.ариф.	Ср. (медиана)	Примечание
<i>Холодный период</i>					
Салехард	2,7	26,1	7,0	5,9	05.12.2016 – 07.03.2017
Надым	<0,5	27,5	6,7	3,5	26.12.2016 – 29.05.2017
	1,0	63,3	13,8	10,7	09.11.2017 – 29.05.2018
	1,1	27,4	9,2	7,9	15.10.2018 – 29.01.2019
<i>Теплый период</i>					
Надым	3,7	22,6	8,5	7,5	30.05.2017 – 08.11.2017
	1,0	29,4	12,2	10,0	04.06.2018 – 12.10.2018

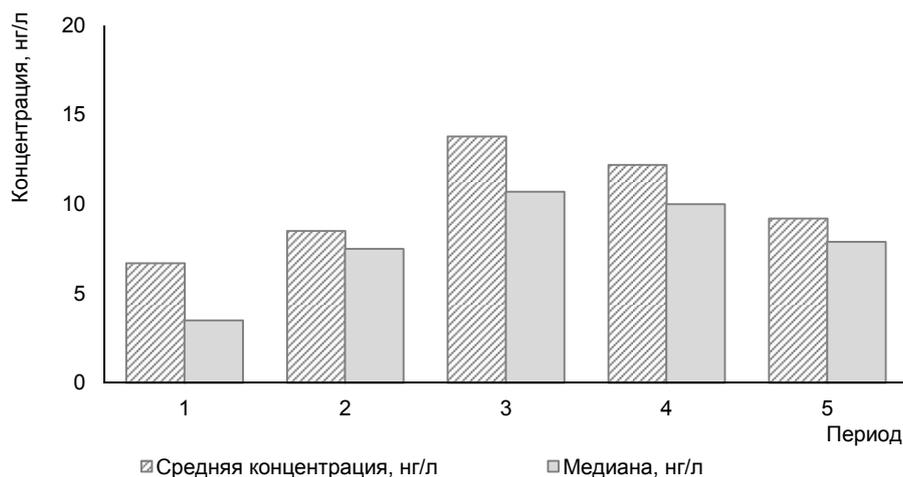


Рис. 2. Концентрация ртути в атмосферных осадках г. Надым, 2016-2019 гг.:
 1 – холодный 2016-2017 гг.; 2 – теплый 2017 г.; 3 – холодный 2017-2018 гг.;
 4 – теплый 2018 г.; 5 – холодный 2018-2019 гг.

Таким образом, ртуть в составе атмосферных выпадений может быть как локально-регионального происхождения, так и поступать в результате дальнего переноса. Чтобы выявить причины увеличения концентраций в последние годы были рассчитаны средневзвешенные сезонные и годовые концентрации и потоки.

Средневзвешенные концентрации

Для репрезентативной оценки уровня загрязнения ртути в различные сезоны года целесообразно использовать ее средневзвешенные концентрации в атмосферных осадках, которые рассчитывали по формуле для единичных событий с учетом вклада каждого события в водном эквиваленте (1):

$$C_{\text{ср.вз}} = \frac{\sum C_i \times P_i}{\sum P} \quad (1)$$

C_i – концентрация вещества в i -ой пробе (нг/дм³); P_i – количество осадков i -ой пробы в водном эквиваленте (мм); P – общее количество осадков за сезон в водном эквиваленте (мм).

Средневзвешенные концентрации более объективно представляют уровень загрязнения по сравнению со средними концентрациями, которые в городах Надым и Салехард близки между собой

(табл. 2). Средневзвешенные значения ртути в атмосферных осадках в г. Салехард почти в два раза ниже, чем в г. Надым в холодный период 2016-2017 гг. (рис. 3), это различие подтверждается результатами анализа в этих же пробах содержания избыточных сульфатов (ex-SO_4^{2-}), которые являются показателями антропогенного загрязнения атмосферы. Содержания ex-SO_4^{2-} (в % в составе сульфатов) составили 37 и 19 в 2016-2017 гг., 34 и 8 в 2017/2018 гг. – для Салехарда и Надыма, соответственно [7]. Таким образом, загрязнение атмосферы Салехарда определяется преимущественно региональными и локальными источниками, тогда как для Надыма основным источником загрязняющих веществ является дальний перенос, а внутриконтинентальные регионально-источники вносят меньший вклад в их поступление.

В г. Надым средневзвешенные концентрации ртути в атмосферных осадках в холодные периоды находятся на близком уровне (период 2018-2019 гг. является неполным, поэтому значение меньше), в летний же период 2018 г. наблюдается значительное повышение концентраций (рис. 3).

В теплые периоды года высокие региональные концентрации могут быть связаны с поступлением ртути при прогреве поверхности тундры, в холодные – ее высокие концентрации обусловлены обильным сжиганием топлива. Разгар лета в Арктике начинается с середины мая, и в это время суммарная солнечная радиация достигает максимальных значений для всего земного шара – 1200 МДж/м². Это происходит из-за высокой прозрачности атмосферы и 24-часового солнечного сияния в течение всего полярного дня. В целом по Северному полушарию весенний и летний периоды 2018 г. стали вторыми самыми теплыми периодами с 1958 г. В Арктике 2018 г. был очень теплым (второй с 1936 г.), аномалия среднегодовой температуры воздуха в широтной зоне 70-85° с.ш. (к которой относится Надым) составляла 3°C. [14].

Исследование содержания тяжелых металлов и ртути в атмосферных осадках Арктических территорий активно

проводилось в разные годы учеными разных стран, в т.ч. российскими [15-19]. Так, в Мурманской области в районе Дальних Зеленцах ее концентрации варьировали в пределах от 2 до 29 нг/л, а средневзвешенная (2001) концентрация составляла 6 нг/л [15]. Для удаленных мест Канадской Арктики и Аляски было показано, что межгодовая изменчивость в течение изученного периода незначительна [19]. Сравнение Hg концентраций в атмосферных осадках г. Надым с аналогичными концентрациями для удаленных мест Арктики показало, что и медиана, и средневзвешенные концентрации ртути в г. Надым находятся на более высоком уровне (табл. 3).

Средневзвешенная годовая концентрация ртути в атмосферных осадках г. Надым, рассчитанная за три года, сопоставима с величинами, сообщаемыми для других урбанизированных территорий (рис. 4).



Рис. 3. Сезонные средневзвешенные концентрации ртути в атмосферных осадках городов Надым и Салехард, нг/л

Таблица 3
Концентрация ртути в атмосферных осадках г. Надым и ряда удаленных мест Арктики

Местоположение	Медиана, нг/л	Средневзвешенная концентрация, нг/л
Nome	3,5	6,2
Glacier Bay National Park	1,8	1,9
Dutch Harbor	2,3	2,9
Дальние Зеленцы	–	6,0
Надым	8,1	9,6

Весеннее истощение атмосферных концентраций ртути

Значительный вклад в поступление ртути на подстилающую поверхность для арктических территорий вносит такое явление как AMDE, так называемые «события атмосферного истощения ртути», которые могут приводить к дополнительному осаждению в Арктике от десятков до сотен тонн Hg ежегодно [20]. Впервые эффект истощения атмосферной ртути в воздухе был зафиксирован (ее концентрации составляли $< 1 \text{ нг/м}^3$) на полярной станции «Алерт» (Канада) в 1995 г. Было установлено, что резкое уменьшение ее концентраций в приземном слое атмосферы происходит преимущественно в весенний период. Исследования 2011-2015 гг. показали, что AMDE равномерно распределяется с апреля по май (по 38 %) [21]. Этот процесс является основным фактором стока ртути из атмосферы, что приводит к ее осаждению на поверхность снега и льда в прибрежной зоне арктических морей [22]. Далее, после ее выведения из атмосферы и выпадения на подстилающую поверхность она проникает во все экосистемы Арктики. События AMDE во время полярной весны тесно связаны с явлениями истощения тропосферного озона (ODE), катализируемыми бромом (т.е. Hg во время наибольшей активности солнечной радиации переходит из устойчивой элементарной в реактивную форму и, реагируя с галогенами, сорбируется на частицах морского аэрозоля).

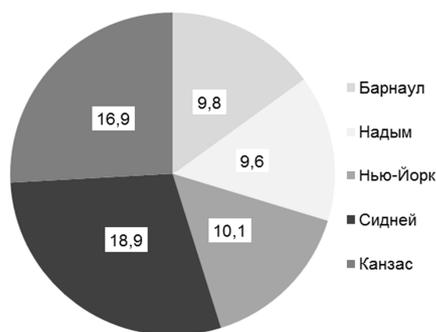


Рис. 4. Средневзвешенные концентрации Hg для различных урбанизированных территорий, нг/л

На территории российской Арктики подобное исследование было проведено на станции «Амдерма» (вблизи побережья Карского моря) [15]. В нашем исследовании максимальные значения также были обнаружены в весенний период, что вероятнее всего, связано с явлением AMDE. На рисунке 5 приведено изменение Hg в атмосферных осадках городов Надым и Салехард (единичные события), демонстрирующее значимый вклад AMDE в общегодовое ее выпадение с атмосферными осадками. Вклад атмосферных осадков, выпадающих в период AMDE, в общегодовое выпадение ртути составляет в 2016/2017 гг. – 12,3 %, а в 2017/2018 гг. – 30,4 %.

Obrist и коллеги [23], используя комбинацию прямых измерений потоков и анализа стабильных изотопов ртути, показали, что в составе ее общего поступления на территорию внутренней арктической тундры выпадения Hg(0) (71 %) преобладали над выпадением за счет атмосферных осадков (5 %) и AMDE (24 %).

Потоки влажного осаждения

С помощью расчета потоков осаждения (2) проведена количественная оценка выпадения ртути на подстилающую поверхность в различные годы и сезоны (рис. 6).

$$\Pi = \frac{C \times P \times 0,1}{S} \quad (2)$$

где Π – поток вещества (мкг/м^2); C – концентрация вещества в пробе (мкг/дм^3); P – количество осадков в водном эквиваленте (мм); S – площадь пробоотборника (дм^2).

Значения потоков в Надыме варьируют в пределах от 0,47 до 1,84 мкг/м^2 , а среднегодовой поток осаждения за изученный период составил 1,8 мкг/м^2 . При сравнении рассчитанных потоков осаждения ртути г.Надым с другими регионами мира обнаружено, что величины в г. Надым существенно ниже, чем в других регионах (Северная Америка –

9,5 мкг/м², Европа – 6,8 мкг/м², Китай – 12,6 мкг/м², в т.ч. удаленные места Китая – от 2 до 7,2 мкг/м²) и сопоставимы с удаленными территориями арктической зоны (Nome – 2,3 мкг/м², Glacier Bay National Park – 3,0 мкг/м², Dutch Harbor 4,5 мкг/м²) [19]. В последние 10 лет не наблюдалось существенного изменения потоков осаждения ртути для арктических территорий, для восточной части США выявлен тренд к снижению, тогда как для западной части изменения были незначительны или увеличивались несмотря на отсутствие увеличения локальной эмиссии ртути, как было показано для мониторинговых точек Национальной сети наблюдений ртутных выпадений США (MDN) [9, 17, 24].

В холодный период года потоки влажного осаждения ртути находятся на близком уровне 0,64-0,65 мкг/м², тогда как в теплый период они изменяются существенно 0,47-1,84 мкг/м². Резкое повышение поступления ртути наблюдается в теплый период 2018 г. Поскольку это не связано с существенным

изменением количества выпавших осадков в летний период, то увеличение потока осаждения ртути может объясняться ее региональным поступлением при таянии вечной мерзлоты, обусловленном высокими температурами в данный период, о чем было сказано выше. Индикатором состояния многолетнемерзлых грунтов, отражающим метеорологические условия отдельных лет, является мощность сезонно-талого слоя (СТС). В Западной Сибири увеличение мощности СТС наиболее значительное отмечалось в районе Надыма – на 37 см по сравнению с 2017 г. [14].

В исследованиях последних лет отмечается, что Арктика является территорией круговорота ртути с высокими стоками и большими ее запасами. В вечномерзлых почвах содержится почти в два раза больше ртути, чем во всех других почвах, океане и атмосфере вместе взятых, и она готова к высвобождению в результате таяния вечной мерзлоты в течение следующего столетия [13, 23, 25-26].

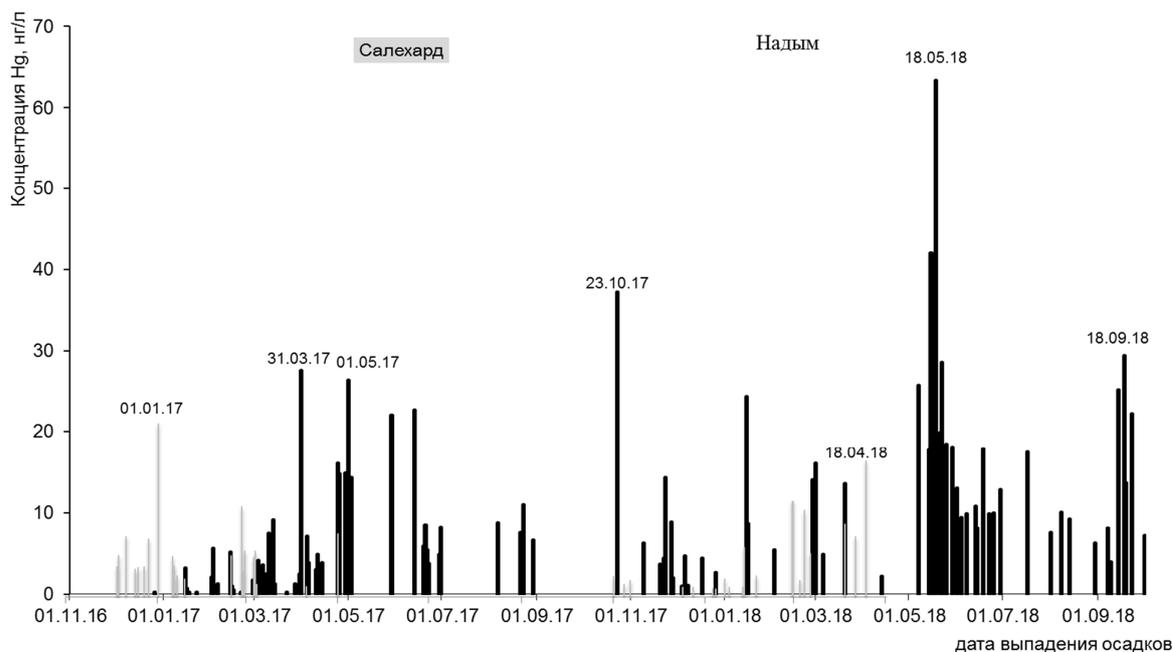


Рис. 5. AMDE для городов Надым и Салехад

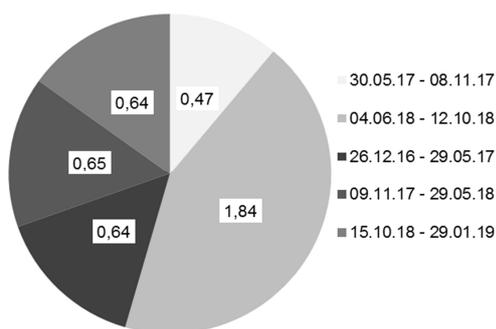


Рис. 6. Потоки влажного осаждения Hg с атмосферными осадками г. Надым, мкг/м²:
темные тона – холодные периоды,
светлые – теплые.

Поскольку влажные выпадения ртути составляют важную часть ее общего баланса, то результаты многолетних натуральных наблюдений могут быть использованы для модельных расчетов и прогнозов, а также понимания атмосферного круговорота Hg в высоких широтах [21].

Работа выполнена в рамках госзадания ИВЭП СО РАН по проекту 0383-2019-0002 «Климатические и экологические изменения и региональные особенности их проявления на территории Сибири по данным палеоархивов и атмосферных осадков», номер госрегистрации АААА-А17-117041210242-1.

Авторы выражают благодарность за отбор проб и сотрудничество коллег Сектора эколого-биологических исследований ГКУ ЯНАО НЦИА д.б.н. Е.В. Агбальян и Е.В. Шинкарук.

Список литературы

1. Durnford D., Dastoor A., Figueras-Nieto D., Ryjkov A., Long range transport of mercury to the Arctic and across Canada // Atmos. Chem. Phys. – 2010. – 10. – P. 6063-6086.
2. AMAP/UN Environment. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme: Oslo, Norway; UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch: Geneva, Switzerland, 2019. – P. 426.
3. Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M., Jacob D.J., Pirrone N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects // Environ. Sci. Technol. – 2013. – 47(10):4967-83. – doi: 10.1021/es305071v.
4. Сайт Росгидромет [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.meteorf.ru/>.
5. US EPA Method 1631, Revision E: Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303), Washington, D.C., 2002.
6. Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Агбальян Е.В., Папина Т.С. Изотопный состав и регионы-источники зимних осадков в Надымской низменности // Лед и Снег. – 2020. – 60(1). – С. 98-108. – <https://doi.org/10.31857/S2076673420010026>.
7. Папина Т.С. Оценка трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию ЯНАО (первые результаты совместных исследований ИВЭП СО РАН и НЦИА) // Обдорья. Современные научные исследования в Арктике: сб. тезисов X юбилейной научно-практ. конф. – Салехард, 2018. – С. 38.
8. Zhang Y., Jacob D.J., Horowitz H.M., Chen L., Amos H.M., Krabbenhoft D.P., Slemr F., St. Louis V.L., Sunderland E.M. Global atmospheric mercury trend // PNAS. – 2016. – 113 (3). – 526-531. – DOI: 10.1073/pnas.1516312113.
9. Olson C.I., Fahraei H., Driscoll C.T. Mercury emissions, atmospheric concentrations, and wet deposition across conterminous United States: changes over 20 years of monitoring // Environ. Sci. Technol. Lett. – 2020. – 7. – P. 376-381.

10. Weiss-Penzias P.S., Gay D.A., Brigham M.E., Parsons M.T., Gustin M.S., Ter Schure A. Trends in mercury wet deposition and mercury air concentrations across the US and Canada // 2016-Sci Total Environ. – 568. – P. 546-556.
11. Mao H., Ye Z., Driscoll C. Meteorological effects on Hg wet deposition in a forested site in the Adirondack region of New York during 2000-2015 // *Atm. Environ.* – 2017. – 168. – 90-100. – doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.058.
12. Tang Y., Wu Q., Gao W., Wang S., Li Z., Liu K., Han D. Impacts of Anthropogenic Emissions and Meteorological Variation on Hg Wet Deposition in Chongming, China // *Atmosphere.* – 2020. – 11(12):1301. – doi.org/10.3390/atmos11121301.
13. Bishop K., Shanley J.B., Riscassi A., Wit H.A., Eklof K., Meng B., Mitchell C., Osterwalder C., Schuster P.F., Webster J., Zhu W. Recent advances in understanding and measurement of mercury in the environment: Terrestrial Hg cycling // *Sci. Total Environ.* – 721. – 137647.
14. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. – М.: Росгидромет, 2019. – 79 с.
15. Панкратов Ф.Ф., Махура А.Г., Попов В.Н., Кац О.В. Увеличение случаев истощения ртути в зимние сезоны во время длительного мониторинга элементарной ртути в российской Арктике // *Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всерос. конф. Междунар. участием.* – Архангельск: ИД САФУ, 2014 – 199 с.
16. Голубева Н.И. Загрязнение атмосферы Арктики токсичными тяжелыми металлами // *Биология и океанография Северного морского пути: Баренцево и Карское моря.* – М.: Наука, 2007. – С. 173-189.
17. National Atmospheric Deposition Program. Annual Data, all MDN sites [Электронный ресурс]. – URL: <http://nadp.sws.uiuc.edu/data/mdn/annual.aspx>.
18. Dommergue A., Larose C., Fann X., Clarisse O., Foucher D., Hintelmann H., Schneider D., and Ferrari C. P. Deposition of mercury species in the Ny-Alesund Area (79°N) and their transfer during snowmelt // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – 44. – P. 901-907. – doi:10.1021/es902579m.
19. Pearson C., Howard D., Obrist D., Moore C.W. Mercury and trace metal wet deposition across five stations in Alaska: controlling factors, spatial patterns, and source regions // *Atmospheric Chemistry and Physics.* – 2019. – 19(10). – P. 6913-6929.
20. Skov H., Christensen J.H., Goodsite M.E., Heidam N.Z., Jensen B., Wahlin, P. et al. Fate of elemental mercury in the arctic during atmospheric mercury depletion episodes and the load of atmospheric mercury to the arctic // *Environ. Sci. Technol.* – 2004. – 38. – P. 2373-2382.
21. Angot H., Dastoor A., De Simone F., Gårdfeldt K., Gencarelli C.N., Hedgecock I. M., Langer S., Magand O., Mastromonaco M.N., Nordstrøm C., Pfaffhuber K.A., Pirrone N., Ryjkov A., Selin N.E., Skov H., Song S., Sprovieri, F., Steffen, A., Toyota, K., Travnikov, O., Yang, X., and Dommergue, A. Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury in polar regions: review of recent measurements and comparison with models // *Atmos. Chem. Phys.* – 2016. – 16. – P.10735-10763. – <https://doi.org/10.5194/acp-16-10735-2016>.
22. Steffen A., Douglas T., Amyot M., Ariya P., Aspmo K., Berg T., Bottenheim J., Brooks S., Cobbett F., Dastoor A., Dommergue A., Ebinghaus R., Ferrari C., Gardfeldt K., Goodsite M.E., Lean D., Poulain A. J., Scherz C., Skov H., Sommar J., and Temme C. A synthesis of atmospheric mercury depletion event chemistry in the atmosphere and snow // *Atmos. Chem. Phys.* – 2008. – 8. – P. 1445-1482. – doi:10.5194/acp-8-1445-2008.

23. Obrist, D., Agnan, Y., Jiskra, M., Olson, C.L., Colegrove, D.P., Hueber, J., et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution // *Nature*. – 2017. – 547. – 201.

24. Сайт Состояние загрязнения ртутью. 2019 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-iw4-02h3.pdf>.

25. Schuster P.F., Schaefer K.M., Aiken G.R., Antweiler R.C., Dewild J.F., Gryziec J.D., et al. Permafrost stores a globally significant amount of mercury // *Geophys. Res. Lett.* – 2018. – 45 (3). – P. 1463-1471.

26. Schaefer K., Elshorbany Y., Jafarov E. et al. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost // *Nature Commun.* – 2020. – 11. – 4650. – <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18398-5>.

References

1. Durnford D., Dastoor A., Figueras-Nieto D., Ryjkov A., Long range transport of mercury to the Arctic and across Canada // *Atmos. Chem. Phys.* – 2010. – 10. – P. 6063-6086.

2. AMAP/UN Environment. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme: Oslo, Norway; UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch: Geneva, Switzerland, 2019. – P. 426.

3. Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M., Jacob D.J., Pirrone N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects // *Environ. Sci. Technol.* – 2013. – 47(10):4967-83. – doi: 10.1021/es305071v.

4. Сайт Росгидромет [Elektronnyy resurs]. – URL <http://www.meteorf.ru/>.

5. US EPA Method 1631, Revision E: Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303), Washington, D.C., 2002.

6. Malygina N.S., Eyrikh A.N., Agbalyan Ye.V., Papina T.S. Izotopny sostav i regiony-istochniki zimnikh osadkov v Nadymsoy nizmennosti // *Led i Sneg*. – 2020. –60(1). – S. 98-108. – <https://doi.org/10.31857/S2076673420010026>.

7. Papina T.S. Otsenka transgranichnogo perenosa zagryaznyayushchikh veshchestv na territoriyu YaNAO (pervye rezultaty sovmestnykh issledovaniy IVEP SO RAN i NTsIA) // *Obdoriya. Sovremennye nauchnye issledovaniya v Arktike: sb. tezisov X yubileynoy nauchno-prakt.konf.* – Salekhard, 2018. – S. 38.

8. Zhang Y., Jacob D.J., Horowitz H.M., Chen L., Amos H.M., Krabbenhoft D.P., Slemr F., St. Louis V.L., Sunderland E.M. Global atmospheric mercury trend // *PNAS*. – 2016. – 113 (3). – 526-531. – DOI: 10.1073/pnas.1516312113.

9. Olson C.I., Fahraei H., Driscoll C.T. Mercury emissions, atmospheric concentrations, and wet deposition across conterminous United States: changes over 20 years of monitoring // *Environ. Sci. Technol. Lett.* – 2020. – 7. – P. 376-381.

10. Weiss-Penzias P.S., Gay D.A., Brigham M.E., Parsons M.T., Gustin M.S., Ter Schure A. Trends in mercury wet deposition and mercury air concentrations across the US and Canada // *2016-Sci Total Environ.* – 568. – P. 546-556.

11. Mao H., Ye Z., Driscoll C. Meteorological effects on Hg wet deposition in a forested site in the Adirondack region of New York during 2000-2015 // *Atm. Environ.* – 2017. – 168. – 90-100. – doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.058.

12. Tang Y., Wu Q., Gao W., Wang S., Li Z., Liu K., Han D. Impacts of Anthropogenic Emissions and Meteorological Variation on Hg Wet Deposition in Chongming, China // *Atmosphere*. – 2020. – 11(12):1301. – doi.org/10.3390/atmos11121301.

13. Bishop K., Shanley J.B., Riscassi A., Wit H.A., Eklof K., Meng B., Mitchell C., Osterwalder C., Schuster P.F., Webster J., Zhu W. Recent advances in understanding and measurement of mercury in the environment: Terrestrial Hg cycling // *Sci. Total Environ.* – 721. – 137647.
14. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossyskoy Federatsii za 2018 g. – M.: Rosgidromet, 2019. – 79 с.
15. Pankratov F.F., Makhura A.G., Popov V.N., Kats O.V. Uvelicheniye sluchayev is-toshcheniya rtuti v zimniye sezony vo vremya dolgovremennogo monitoringa elementarnoy rtuti v rossyskoy Arktike // *Sostoyaniye arkticheskikh morey i territoriy v usloviyakh izmeneniya klimata: sb. tezisov Vseros. konf. Mezhdunar. uchastiyem.* – Arkhangel'sk: ID SAFU, 2014 – 199 s.
16. Golubeva N.I. Zagryazneniye atmosfery Arktiki toksichnymi tyazhelymi metallami // *Biologiya i okeanografiya Severnogo morskogo puti: Barentsevo i Karskoye morya.* – M.: Nauka, 2007. – S. 173-189.
17. National Atmospheric Deposition Program. Annual Data, all MDN sites [Электронный ресурс]. – URL: <http://nadp.sws.uiuc.edu/data/mdn/annual.aspx>.
18. Dommergue A., Larose C., Fann X., Clarisse O., Foucher D., Hintelmann H., Schneider D., and Ferrari C. P. Deposition of mercury species in the Ny-Alesund Area (79°N) and their transfer during snowmelt // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – 44. – P. 901-907. – doi:10.1021/es902579m.
19. Pearson C., Howard D., Obrist D., Moore C.W. Mercury and trace metal wet deposition across five stations in Alaska: controlling factors, spatial patterns, and source regions // *Atmospheric Chemistry and Physics.* – 2019. – 19(10). – P. 6913-6929.
20. Skov H., Christensen J.H., Goodsite M.E., Heidam N.Z., Jensen B., Wahlin, P. et al. Fate of elemental mercury in the arctic during atmospheric mercury depletion episodes and the load of atmospheric mercury to the arctic // *Environ. Sci. Technol.* – 2004. – 38. – P. 2373-2382.
21. Angot H., Dastoor A., De Simone F., Gårdfeldt K., Gencarelli C.N., Hedgecock I. M., Langer S., Magand O., Mastromonaco M.N., Nordstrøm C., Pfaffhuber K.A., Pirrone N., Ryjkov A., Selin N.E., Skov H., Song S., Sprovieri, F., Steffen, A., Toyota, K., Travnikov, O., Yang, X., and Dommergue, A. Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury in polar regions: review of recent measurements and comparison with models // *Atmos. Chem. Phys.* – 2016. – 16. – P.10735-10763. – <https://doi.org/10.5194/acp-16-10735-2016>.
22. Steffen A., Douglas T., Amyot M., Ariya P., Aspmo K., Berg T., Bottenheim J., Brooks S., Cobbett F., Dastoor A., Dommergue A., Ebinghaus R., Ferrari C., Gardfeldt K., Goodsite M E., Lean D., Poulain A. J., Scherz C., Skov H., Sommar J., and Temme C. A synthesis of atmospheric mercury depletion event chemistry in the atmosphere and snow // *Atmos. Chem. Phys.* – 2008. – 8. – P. 1445-1482. – doi:10.5194/acp-8-1445-2008.
23. Obrist, D., Agnan, Y., Jiskra, M., Olson, C.L., Colegrove, D.P., Hueber, J., et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution // *Nature.* – 2017. – 547. – 201.
24. Sayt Sostoyaniye zagryazneniya rtutyu. 2019 [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-iw4-02h3.pdf>.
25. Schuster P.F., Schaefer K.M., Aiken G.R., Antweiler R.C., Dewild J.F., Gryziec J.D., et al. Permafrost stores a globally significant amount of mercury // *Geophys. Res. Lett.* – 2018. – 45 (3). – P. 1463-1471.
26. Schaefer K., Elshorbany Y., Jafarov E. et al. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost // *Nature Commun.* – 2020. – 11. – 4650. – <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18398-5>.

ASSESSMENT OF MERCURY CONCENTRATIONS AND FLUXES
FROM THE ATMOSPHERE ON THE TERRITORY
OF THE YAMAL-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT

L.V. Shol, S.S. Eyrikh, E.G. Ilyina

Altai State University, Barnaul, E-mail: lilichkashol661@gmail.com, ilina@chem.asu.ru
Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Барнаул, E-mail: steyrikh@gmail.com

The content of mercury in atmospheric wet precipitation of Nadym and Salekhard varied in the range of 0,5-63,3 ng/L and 2,7-26,1 ng/L, respectively. Volume-weighted total mercury concentration (VWC) in atmospheric precipitation during the cold period in Nadym is twice more than in Salekhard. Annual VWC in atmospheric precipitation in Nadym is comparable with the values obtained for other urbanized regions of the world, although it is much higher than values reported for remote places in the Arctic. Highest Hg concentrations observed in the spring time most likely attributed to Atmospheric Mercury Depletion Events (AMDE). The contributions of atmospheric precipitation during AMDE period to the annual Hg deposition were 12,3 % and 30,4 % in 2016/2017 and 2017/2018, respectively. The average annual Hg fluxes in Nadym (for 3-year) are significantly lower than annual fluxes in other regions (USA, Europe, and China), but comparable with the average annual fluxes for remote territories of the Arctic zone. In the cold periods of the year, the Hg fluxes with wet deposition in Nadym are at a similar level (0,64-0,65 $\mu\text{g}/\text{m}^2$), while they differ significantly in the warm period (0,47-1,84 $\mu\text{g}/\text{m}^2$). The sharp increase in mercury deposition observed in the warm period of 2018 that can be explained by regional input during the thawing of permafrost caused by high temperatures in this period. Temperature in Arctic in 2018 was the second value after 1936 and an increase in the thickness of the seasonally thawed layer in the region Nadym was 37 cm (compared to 2017).

Key words: mercury, Arctic, atmospheric precipitation, volume-weighted concentrations, deposition fluxes, AMDE, permafrost thawing.

Received December 3, 2020