

Панкратов Фидель Федорович

**ДИНАМИКА АТМОСФЕРНОЙ РТУТИ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ДОЛГОВРЕМЕННОГО МОНИТОРИНГА**

**Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология и
агрометеорология**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Санкт-Петербург

– 2013 –

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-производственное объединение «Гайфун».

Научный руководитель: доктор биологических наук,
Коноплев Алексей Владимирович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией Моделирования
климата и прогноза загрязнения атмосферы
федерального государственного бюджетного
учреждения «Главная геофизическая
обсерватория им. А.И. Воейкова»,
Генихович Евгений Львович.

кандидат географических наук,
заведующей кафедрой Климатологии и
мониторинга окружающей среды
Санкт-Петербургского государственного
университета
Священников Павел Николаевич.

Ведущая организация: Российский государственный гидрометеорологический
университет (РГГМУ).

Защита диссертации состоится «11» декабря 2013 г. в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.005.01 в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова».

Автореферат разослан «10» ноября 2013 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук



А. В. Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ртуть – один из наиболее токсичных тяжелых металлов, загрязнение которыми представляет серьезную угрозу для природной среды Арктики. Атмосферный перенос в высокоширотную область полярных регионов является основным каналом поступления ртути из средних и южных широт, где источниками ртути могут быть как антропогенные, так и природные объекты. Вторым по величине каналом поступления ртути в Арктику являются реки бассейна Северного Ледовитого океана. Обладая уникальными свойствами, ртуть способна перемещаться на большие расстояния, осаждаться на подстилающую поверхность и трансформироваться в более токсичные соединения. В дальнейшем это приводит к накоплению ртути в различных Арктических экосистемах. В 1998 г. на полярной станции «Алерт» (Канада) был зафиксирован эффект «истощения» атмосферной ртути в воздухе (AMDEs - Atmospheric Mercury Depletion Events). Это событие когда в весенний период времени происходит резкое уменьшение концентрации ртути в приземном слое атмосферы. Этот процесс является основным фактором стока ртути из атмосферы, вследствие этого происходит интенсивное осаждение ртути на поверхность снега и льда в прибрежной зоне арктических морей. Находящиеся в почве микроорганизмы трансформируют осажденную элементарную ртуть в наиболее токсичные органические формы, например метилртуть. В дальнейшем, органические формы ртути по пищевым цепочкам накапливаются в рыбе, морских млекопитающих, высших хищниках и в конечном итоге с продуктами питания в организме коренных жителей. За последние 100 лет выбросы из антропогенных источников привели к двукратному увеличению ртути в верхнем 100 метровом слое мирового океана, что привело к интенсивному загрязнению разнообразных биообъектов.

Цель исследования:

- Анализ динамики концентрации элементарной газообразной ртути (ЭГР) в приземном слое атмосферы российской Арктики на основе полученных данных долговременного мониторинга;
- Оценка влияния солнечной радиации и метеорологических величин (температуры, относительной влажности, скорости ветра) на поведение элементарной ртути во время событий истощения атмосферной ртути;
- Оценка вероятного местоположения источников поступления ртути в Арктику, используя метод траекторного моделирования с расчетом обратных траекторий (модель NOAA HYSPLIT).

Научная новизна определяется тем, что впервые в Российской Арктике:

- получен долговременный (12 летний период наблюдений) ряд значений концентрации ЭГР в приземном слое атмосферы на арктической станции «Амдерма»;
- зарегистрированы процессы истощения ртути, что подтверждает существование подобных явлений во всех регионах в прибрежной полосе арктических морей за полярным кругом северного полушария;
- как в период полярной ночи, при полном отсутствии солнечного света и без активации фотохимических реакций отвечающих за вывод ртути из атмосферы, так и в летний период времени при максимальной интенсивности солнечного излучения, были зарегистрированы процессы истощения ртути;
- показано, что динамика поведения ртути в приземном слое атмосферы при проведении измерений в трех точках прибрежной области зависит от расстояния до береговой черты Карского моря;

Теоретическая и практическая значимость работы. Впервые на полярной станции «Амдерма» реализована современная методика пробоотбора и измерения ЭГР (далее ртути) на базе анализатора «Tekran 2537A». Полученные результаты измерений могут быть использованы в модельных оценках для расчета поступления ртути в экосистемы Арктики. Для разных времен года, ночных и дневных периодов времени проведен статистический анализ долговременных рядов концентрации ртути в российской Арктике, что позволило впервые оценить степень влияния метеорологических величин и солнечной активности на динамику элементарной ртути в приземном слое атмосферы. Зарегистрированы повышенные значения концентрации атмосферной ртути в период извержения вулканов в Исландии (весной 2010 и 2011 г.г.). Данные о повышенных значениях концентраций могут быть использованы при определении вероятных источников загрязнения, находящихся как за полярным кругом, так и в других регионах северного полушария.

Автор выносит на защиту:

1. Зарегистрирована динамика на уменьшение значений элементарной газообразной ртути в приземном слое атмосферы по результатам проведения долговременного мониторинга элементарной ртути в российской Арктике.
2. Эффект истощения ртути, регистрируемый как при максимальной солнечной активности в весенне-летние периоды так и во время полярной ночи при полном отсутствии солнечной радиации зависит от динамики метеовеличин таких как температура, относительная влажность и скорость ветра в приземном слое атмосферы.

3. На общую динамику ртути в приземном слое атмосферы влияет изменение расстояния от места, где установлен анализатор, до побережья Карского моря, что подтверждает существование ограниченной области для процессов истощения ртути.

4. Впервые зарегистрировано и доказано, что увеличение концентрации ртути в приземном слое атмосферы во время извержения вулканов в Исландии (весной 2010 и 2011 г.г.) происходило за счет дальнего атмосферного переноса в северном полушарии.

Личный вклад автора.

Организация, постановка задач и выполнение программы измерений на полярной станции «Амдерма», периодическая ручная калибровка и настройка измерительного комплекса, сбор данных измерений концентраций ртути и их обработка, статистический анализ в совокупности с метеорологическими величинами, обобщение и интерпретация полученных результатов были выполнены лично автором.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов основаны на использовании прецизионного аналитического оборудования, применяемого в процессе измерения атмосферной ртути на полярной станции; на сравнительном анализе и согласованности методик измерений и полученных данных с результатами других исследователей.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS (Томск, 2008 г.); Научной конференции «Вклад России в МПГ» (Сочи, 2008 г.); Международной конференции в рамках III Международного Полярного Года (МПГ) (Санкт-Петербург, 2008 г.); Всесоюзной конференции «Научный потенциал – XXI» (Москва, 2009 г.); Международном симпозиуме «Ртуть в биосфере: Эколого-геохимические аспекты», ГЕОХИ РАН (Москва, 2010 г.); Международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2011» (Томск, 2011 г.); Международной конференции «Mercury as a Global Pollutant» (Halifax, 2011); Международной конференции «Physical and Chemical Processes Including Atmosphere-Ice Chemical Interactions (AICI)» (Vienna, Austria, 2012); Международной конференции «IEA Clean Coal Centre Workshop, 9th Mercury Emissions from coal (MEC)» (St. Petersburg, 2012); Международной конференции «Mercury as a Global Pollutant», (Edinburg, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах, 6 публикаций и 9 тезисов докладов в трудах конференций. Не по теме диссертации опубликована 1 статья в рецензируемом журнале и 3 публикации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Материал изложен на 127 страницах, содержит 63 иллюстрации и список литературы из 166 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены основные пути поступления элементарной ртути, как в различные регионы, так и в высокоширотные районы Арктики. Приведены модельные оценки локального, регионального и дальнего атмосферного переноса, структурные схемы распределения потоков, показывающие общее взаимодействие между наземными и водными системами, связанными с атмосферным циклом ртути. Также показано долевое соотношение вклада различных источников в глобальную антропогенную эмиссию ртути.

Во второй главе описаны методы и средства измерения, применение автоматической и ручной калибровки и оценка погрешности во время проведения измерений. Представлены новые подходы и перспективное оборудование для измерения ртути в приземном слое атмосферы.

На базе полярной станции «Амдерма» был установлен ртутный анализатор «Tekran 2537A» (рис.1). При использовании данного аппаратного комплекса выполняются непрерывные измерения элементарной газообразной ртути (ЭГР) в приземном слое атмосферы с высоким временным разрешением 5 минут и пределом чувствительности 0,1 нг/м³.



Рис. 1. Комплекс оборудования для автоматического измерения содержания ртути в воздухе, установленный на полярной станции «Амдерма» (Россия); Газовый анализатор «Tekran 2537A» используется для измерения (с ультранизким пределом обнаружения) концентрации газообразной ртути в приземном слое атмосферы.

Прибор имеет следующие характеристики: высокое временное разрешение (от 5 мин. до 200 часов); объем прокаченного воздуха от 0,7 до 1,5 л/мин; для сорбции ртути используется ловушка из золота высшей пробы; автоматическая внутренняя калибровка

во время процесса измерения ртути; полная автономность в процессе измерения и обработки данных. После периода накопления амальгамированная ртуть термически десорбируется, и количественно определяется с помощью атомно-флуоресцентного спектрометра холодного пара. Измерения ртути в атмосферном воздухе проводились каждые 30 минут для одного из двух каналов. После контроля качества полученных значений концентрации ртути рассчитывается среднее значение между двумя последовательными измерениями в двух каналах (среднее за 1 час измерений) и среднесуточные концентрации ртути в воздухе.

В третьей главе изложены результаты исследований динамики атмосферной ртути в Арктике. Представлены данные о климатических характеристиках Югорского п-ова, где установлен анализатор “Tekran 2537A” и проводится долговременный мониторинг.

Зависимость между значениями концентрации ртути в атмосфере и местоположением газового анализатора.

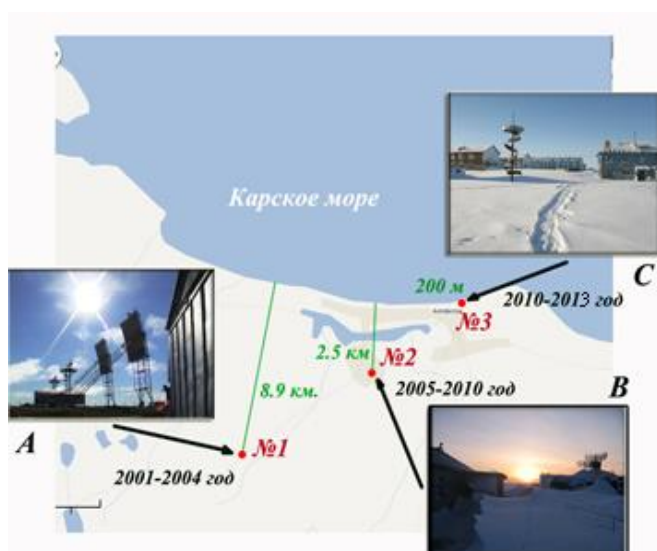


Рис. 2. Места установки анализатора за весь период наблюдения 2001 - 2013 г.г.

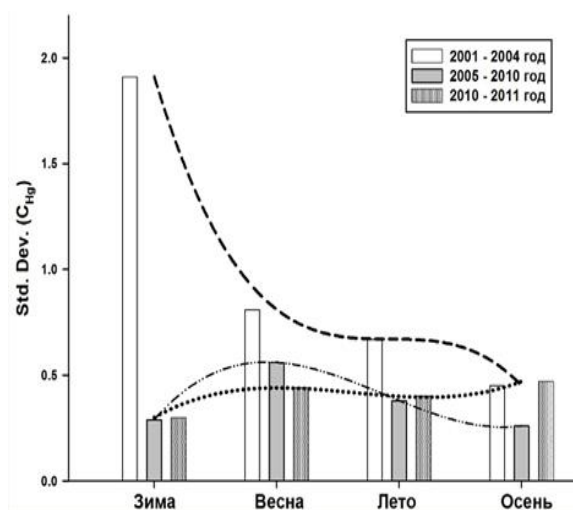


Рис. 3. Значения среднеквадратичного отклонения, рассчитанные для периода 2001-2011 г.г. с сезонным распределением.

В течение 12-летнего периода наблюдений анализатор “Tekran 2537A” находился в трех точках. С 2001 г. прибор находился на разных расстояниях (от 8.9 до 0.2 км) от побережья Карского моря (см. рис 2). Отметим, что данный эксперимент в практике мониторинга тяжелых металлов в приземном слое атмосферы на российской полярной станции был проведен впервые. Климатические характеристики Югорского п-ова, где установлен анализатор и проводится долговременный мониторинг, оказывают значительное влияние на концентрации измеряемой ртути. Долговременный ряд значений концентрации ртути за весь период проведения исследования на полярной станции

«Амдерма» показан на рис.4. Анализ полученных данных в точке №1 показал, что в 2001–2004 г.г. среднее значение концентрации ртути составило $1,65 \pm 1,91$ нг/м³, (макс. – 75,5 нг/м³ и мин. - 0,1 нг/м³, соответствующее пределу обнаружения).

Следует отметить, что в эти годы не наблюдался понижающий тренд для средних значений концентрации ртути. Количество случаев повышенных значений концентрации ($> 1,8$ нг/м³) оставалось неизменным в течение всех сезонов, что не характерно для общей тенденции понижения концентрации ртути в арктическом регионе.

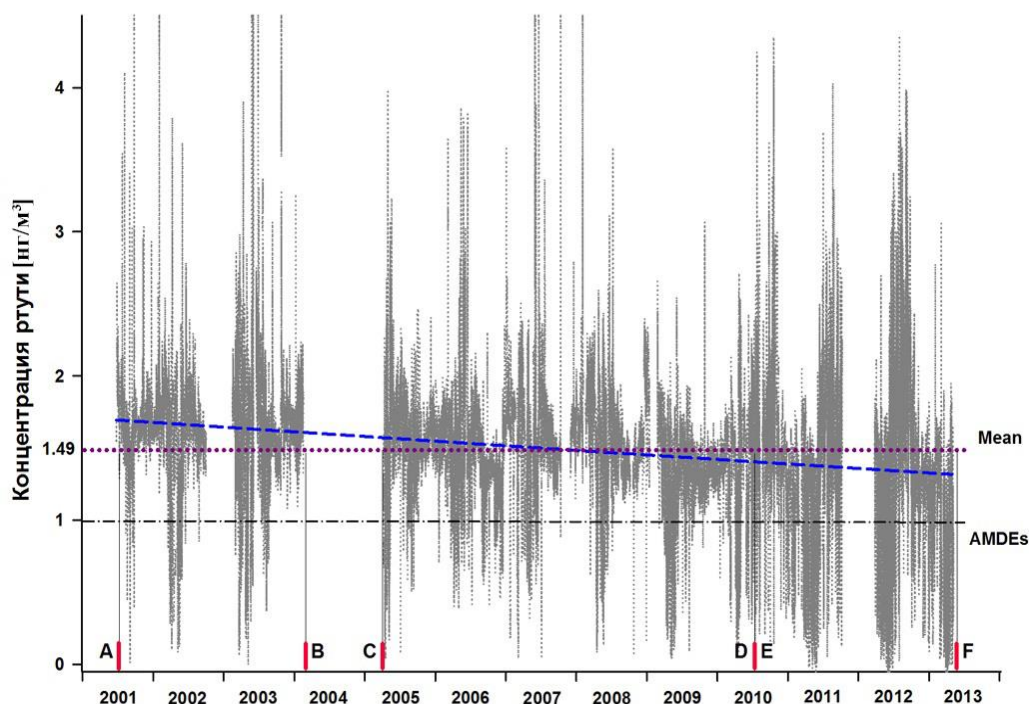


Рис. 4. Долговременный ряд значений концентрации атмосферной ртути за период 2001–2004 г.г. (A,B), 2005–2010 г.г.(C,D) и 2010 –2013 г.г. (E,F) для полярной станции «Амдерма»; для периода 2001–2013 г.г.: линейная аппроксимация тренда (синяя штриховая линия); среднее значение (фиолетовая точечная линия); область «истощения» ртути (штрихпунктирная линия - AMDEs).

В то же время для этого периода отмечается максимальная вариабельность концентрации ртути в приземном слое атмосферы и расчетное значение стандартного (среднеквадратического) отклонения (σ) для всего периода проведения мониторинга составило $\pm 1,91$ нг/м³. На основе полученных результатов можно предположить, что точка №1 находится на границе области, где случаи истощения ртути проявляются не столь интенсивно (около 9 км от побережья Карского моря (рис. 4, AB)) как для береговой зоны арктических морей, точки №2 и №3 (рис. 4, C-F).

Анализ полученных данных в точке №2 показал, что за 2005–2010 г.г. среднее значение концентрации ртути составило $1,48 \pm 0,4$ нг/м³ и макс. - 14,53 нг/м³, а расчетное значение σ находилось в диапазоне от $\pm 0,4$ до $\pm 0,6$ нг/м³ (рис. 3). Для данного периода

был зафиксирован понижающий тренд ($-0,04 \text{ нг/м}^3/\text{год}$) (рис. 4,CD). Стандартное отклонение для периода проведения мониторинга в точке №2 составило $\sigma = \pm 0,4 \text{ нг/м}^3$. Однако впервые, во время полярной ночи 2006–2007 г.г. были зафиксированы продолжительные случаи истощения ртути, при полном отсутствии солнечной радиации. В то же время в весенне-летний сезон 2010 г. зафиксированы значения с повышенной концентрацией ртути, что не характерно для этого временного периода с учетом общей динамики уменьшения её концентрации в северном полушарии. Модельные оценки с использованием метода обратных траекторий показали, что атмосферный фронт с северо-западного направления мог принести в район мониторинга аэрозоль и вулканический пепел от активного в этот период вулкана Eyjafjallajökull.

В июне 2010 г. анализатор был установлен в точке №3 (около 200 м от береговой линии Карского моря). Анализ полученных данных показал, что с июня 2010 по октябрь 2013 г. среднее значение концентрации ртути составило $1,38 \pm 0,84 \text{ нг/м}^3$, макс. - $94,35 \text{ нг/м}^3$. Для данного временного периода зафиксирован понижающий тренд ($-0,04 \text{ нг/м}^3/\text{год}$) (рис. 4,EF). Подобная динамика продолжает общий понижающий тренд, который начался в 2005 г. Следует отметить, что наименьшее из средних значений ртути ($1,23 \text{ нг/м}^3$) было зафиксировано в 2013 г. и с 2010 по 2012 г. наблюдается постепенное увеличение значения σ : от $\pm 0,42 \text{ нг/м}^3$ (2010 г.) до $\pm 1,32 \text{ нг/м}^3$ (2013 г.).

В 2012 г. было зарегистрировано самое большое (1197) количество эпизодов повышенных значений концентрации ртути ($\geq 1,8 \text{ нг/м}^3$) и самое большое количество (84 случая) событий истощения ртути (AMDEs) за весь период мониторинга. Такая динамика ртути определяется влиянием близости Карского моря и изменчивостью метеорологических параметров, в первую очередь температуры и относительной влажности в приземном слое атмосферы.

Изменчивость значений концентрации атмосферной ртути в зависимости от метеорологических параметров.

При описании случаев истощения ртути используется следующая терминология. Если процесс уменьшения концентрации ртути в приземном слое атмосферы протекает в течение короткого периода времени (не более 1 часа) и при этом регистрируются единичные минимальные значение (до $0,1 \text{ нг/м}^3$), а затем концентрация возвращается к усредненным для данного региона значениям концентрации ($1,5\text{--}1,7 \text{ нг/м}^3$) то такой эпизод принято считать «краткосрочным» случаем истощения ртути. Если процесс истощения ртути протекает от нескольких часов до нескольких суток и значения концентрации в этот период времени остаются ниже порогового уровня ($< 1,0 \text{ нг/м}^3$), то

такой случай принято считать «длительным». В соответствии с этим (рис. 5а,б) приведены примеры «краткосрочного» и «длительного» случая истощения ртути, а также суточный ход температуры в приземном слое атмосферы для двух эпизодов: март 2002 г. и февраль - март 2007 г. Для данных примеров показано, что длительность светового периода не оказала влияния на эффект истощения ртути в приземном слое атмосферы. Для первого эпизода (с 29 по 30 марта 2002 г.) температура воздуха в течение суток менялась в диапазоне от -26 до -31°C (рис. 5,а) и при достижении минимального значения был зафиксирован эффект истощения с минимальным значением концентрации ($0,39 \text{ нг/м}^3$). Следует отметить, что это значение было получено в период отсутствия интенсивного солнечного излучения (темный прямоугольник на рис. 5,а).

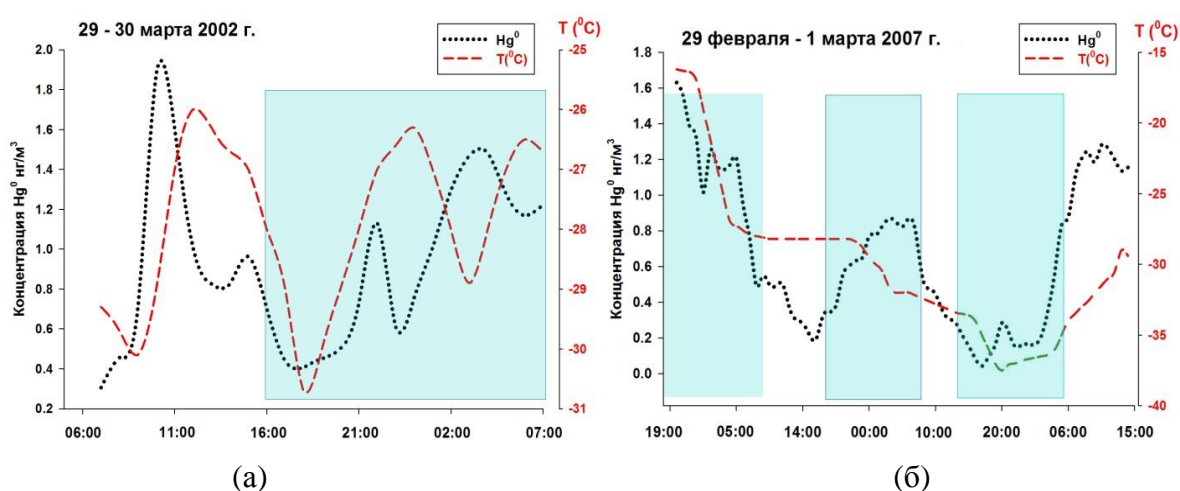


Рис. 5. а) Симбатные кривые для концентрации ртути и температуры в приземном слое: а) эффект AMDE за период с 29 по 31 марта 2002 г., б) с 29 февраля по 1 марта 2007 г.

В данных примерах были зафиксированы случаи истощения ртути при понижении температуры в приземном слое атмосферы и отсутствии интенсивной турбулентности над снежным покровом. Один из «длительных» эпизодов истощения ртути был зарегистрирован с 29 февраля по 1 марта 2007 г. (рис. 5,б). Температура в этот период понижалась с -16 до -37°C и значение концентрации ртути на момент достижения минимальной температуры составило $0,1 \text{ нг/м}^3$. В то же время скорость ветра в обоих случаях не превышала 10 м/с . В основном, случаи истощения не регистрируется, если скорость ветра превышает 10 м/с , хотя в некоторых случаях уменьшение концентрации ртути наблюдалось и при более высоких скоростях ветра. Следует отметить, что процессы низкотемпературной сублимации водяного пара с осаждением ртути на образующиеся в приземном слое атмосферы кристаллы льда играет основную роль для активизации процессов во время истощения. Данный эффект вносит существенный вклад на вывод ртути из приземного слоя атмосферы. Случаи истощения ртути также могут быть вызваны

её осаждением на частицах морского аэрозоля, концентрация которого возрастает в случае освобождения ото льда прибрежной зоны Карского моря. В то же время процесс образования частиц сульфата аммония в периоды юго-западного и юго-восточного атмосферного переноса, приводит к захвату атмосферной ртути аэрозольными частицами и как следствие к возникновению событий истощения ртути. Исследования, проводимые на Северной Земле, и на Земле Франца-Иосифа показали, что в атмосфере Арктики подобным сезонным изменениям подвержены такие антропогенные металлы как Pb, V, As, Ni, Zn и Cd, т.е. для них также наблюдается уменьшение концентрации в весенний период.

В четвертой главе приведен анализ данных для случаев истощения ртути в различные сезонные периоды и для случаев, когда анализатор находился в различных точках проведения мониторинга. Также показаны результаты расчета интенсивности солнечной активности и активизации процессов истощения ртути в этот период времени. Анализ показал, что не всегда увеличение солнечной радиации вызывает рост случаев истощения ртути из приземного слоя атмосферы.

Суточная динамика атмосферной ртути в период полярной весны.

В качестве примера рассмотрен суточный ход пониженных значений концентрации ($< 1,0 \text{ нг/м}^3$) рассчитанный для весны (март – май) 2005 и 2011 г.г. (рис.6 а,б).

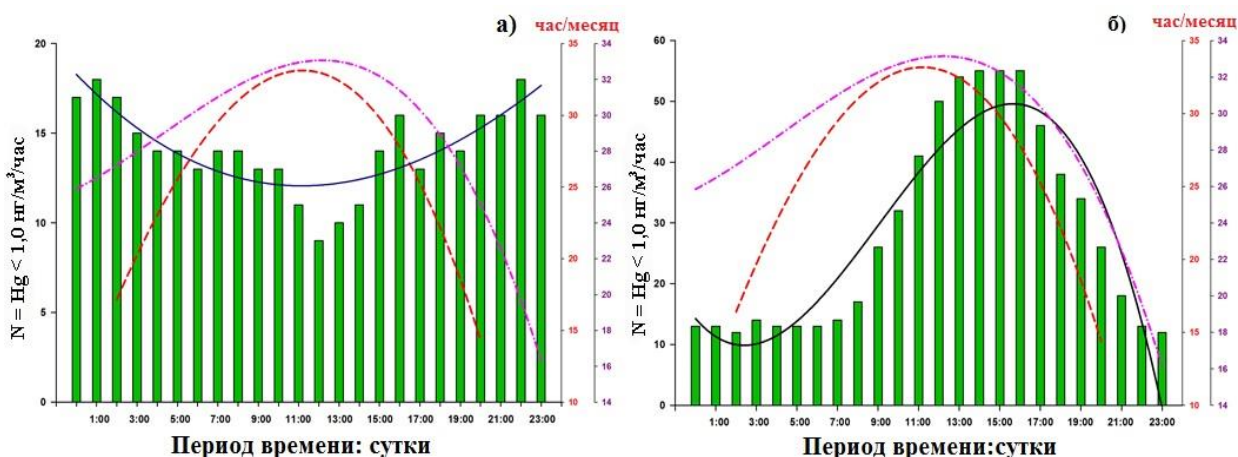


Рис. 6. Суточная динамика ртути ($< 1,0 \text{ нг/м}^3$) сплошная линия - полиномиальная линия тренда, солнечная активность: в марте (штриховая красная линия – полиномиальная линия тренда) и в мае (штрих пунктирная фиолетовая линия - полиномиальная линия тренда) в весенний период (а) 2005 г. и (б) 2011 г.

Для весны 2005 г. (рис. 6,а) показано, что интенсивность солнечной радиации напрямую не влияет на увеличение количества пониженных значений концентрации ртути. С возрастанием солнечной активности в течение суток наблюдается обратный эффект, т.е. с 9:00 до 15:00 часов зафиксировано уменьшение количества пониженных

значений концентрации (4 случая истощения ртути в период максимальной активности). В то же время для вечернего периода, с 17:00 до 02:00 часов было зарегистрировано наибольшее количество пониженных значений и 12 случаев истощения ртути. Подобная динамика ртути может зависеть от наличия ледового покрова в прибрежной зоне Карского моря. В случае для 2005 г., в момент достижения дневного максимума солнечной активности не наблюдаются процессы истощения ртути, что может быть связано с отсутствием большого количества морского аэрозоля в приземном слое атмосферы (рис. 6,а) хотя процессы фотохимических реакций не прекращались. Для весны 2011 г. зафиксировано увеличение случаев истощения ртути (до 62 событий) во время наибольшей суточной активности солнца (рис. 6,б). Однако весной этого года отсутствовал ледовый покров в прибрежной полосе, и вследствие этого в приземном слое атмосферы могло находиться большое количество морского аэрозоля. В период наступления полярной весны активизируется процесс фотохимических реакций с участием галогенов Br^\cdot и Cl^\cdot , однако как показано для случая 2005 г. это не являлось основной причиной возникновения случаев истощения ртути.

Суточная динамика в летний период.

Уникальные случаи истощения ртути зафиксированы летом 2003 г. в период с 29 июня по 20 августа включительно. Подобный эффект не характерен для летнего сезона и связан с отсутствием как основного снежного покрова, так и фотохимических реакций, протекающих в приземном слое атмосферы. Необходимо отметить, что в течение лета регистрируются повышенные концентрации ртути вследствие активного испарения различных её форм при интенсивном прогреве поверхности тундры. Тем не менее, было зафиксировано 5 случаев истощения ртути для данного временного периода.

Следует отметить, что для этих случаев характерна общая тенденция. Во время истощения ртути наблюдается понижение значений температуры и относительной влажности. В то же время эти значения варьируются в широком диапазоне (температура: от 3 до $14,5^\circ\text{C}$; относительная влажность: от 62 до 98%). Для рассчитанных значений коэффициентов корреляции между концентрацией ртути, температурой и относительной влажностью (рис. 7 а,б) был рассмотрен случай с наиболее длительным периодом истощения (34 часа, с 09.08.–11.08.). Получена статистически значимая линейная характеристика, следовательно, для данного случая существует корреляционная зависимость. Большинство значений для рассчитанных парных регрессий находится в области истощения ртути и минимальные значения концентрации находятся в области температур (от $2,3$ до $7,1^\circ\text{C}$) (рис. 7,б). Это указывает на то, что определяющими

факторами активизации процессов истощения ртути являются пониженные значения температуры и относительной влажности.

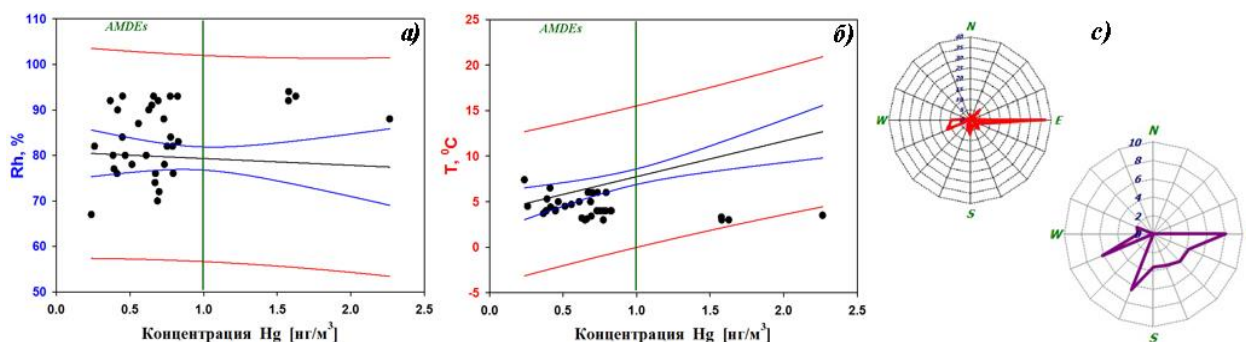


Рис. 7. Парная регрессия для значений концентрации ртути (10.08, 34 часа) в период AMDEs: а) влажности и б) температуры в приземном слое атмосферы; область AMDEs (вертикальная зеленая линия); в) роза ветров (направление – красная и скорость ветра – фиолетовая диаграмма) рассчитанная для данного случая.

Анализ данных направления и скорости ветра показал, что для зарегистрированных случаев истощения ртути наблюдается общая тенденция. Во всех случаях зафиксирован перенос воздушных масс с южного и юго-восточного направлений (рис. 7,в). В этом секторе российской Арктики находится Воркутинский угольный бассейн и установки по сжиганию попутного газа. Соответственно, частицы сажи, образующиеся при сжигании органического топлива, могут служить центрами сорбции ртути, что в дальнейшем приводит к ее выводу из приземного слоя атмосферы и осаждению на подстилающую поверхность.

Суточная динамика в зимний период.

В зимний сезон (декабрь-январь) 2010–2011 г.г. (рис. 8,а) было зарегистрировано максимальное количество пониженных значений ртути (495) и случаев истощения ртути (32 случая), которые до этого времени наблюдались только в зимний сезон 2006–2017 г.г. (13 случаев). Возможно, выведение ртути из атмосферы было вызвано другими физико-химическими процессами, не связанными с фотохимическими реакциями. В зимний период времени отсутствует прямое солнечное излучение, в связи с этим (в графическом представлении) склонение солнца над горизонтом имеет отрицательное значение (красная линия на уровне оси периода времени). С середины января начинает увеличиваться продолжительность дня, но солнечной энергии недостаточно для активизации фотохимических реакций, т.к. доминирует рассеянная, а не прямая солнечная радиация (рис.8 а, фиолетовая линия). Однако в это время были зарегистрированы случаи истощения ртути. Максимальное количество случаев зарегистрировано в январе 2011 г.

(18 случаев, наибольшая продолжительность – 46 час). Весной, начиная со второй половины марта (рис. 8,б), увеличивается угол склонения солнца над горизонтом и поступающей солнечной энергии достаточно для активизации фотохимических реакций. Однако весной (март – май) не наблюдается линейной зависимости между увеличением количества солнечной энергии (красная сплошная линия) и количеством случаев истощения ртути (рис. 8,б).

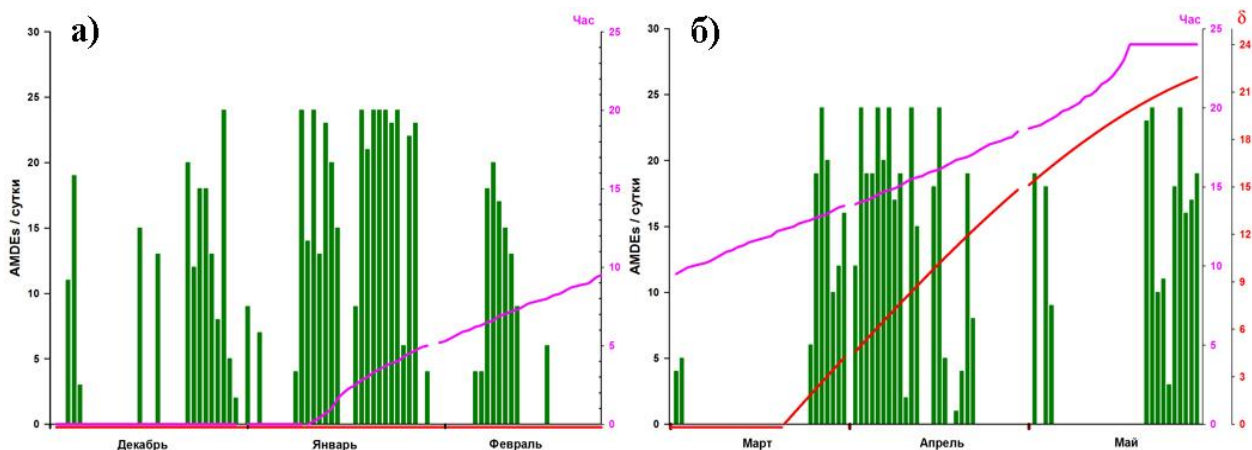


Рис. 8. Количество пониженных значений ртути в течение суток (столбчатая диаграмма), долгота дня (час, фиолетовая линия), и склонение солнца (δ - красная линия) над горизонтом: (а) декабрь-январь 2010-2011 г.г. и (б) март-май 2011 г.

Максимальное количество пониженных значений (300) и случаев истощения ртути (21 случай) с максимальной продолжительностью (до 66 часов) было зарегистрировано в апреле, хотя в это время фиксируется не самая высокая интенсивность солнечной радиации. Подобные случаи вывода ртути из приземного слоя атмосферы, и регистрация случаев истощения ртути, предположительно связаны с наличием больших концентраций морского аэрозоля.

Динамика случаев истощения и увеличения ртути.

На основе данных долговременного мониторинга можно получить представление о сложных физико-химических процессах, протекающих в приземном слое атмосферы и на которые потепление в Арктическом регионе оказывает значительное воздействие. Для обозначения случаев, когда в течение длительного времени (не менее 2 часов) в приземном слое атмосферы регистрируются повышенные значения концентрации ртути ($> 1,8 \text{ нг/м}^3$) аналогично термину «истощения» используется термин «увеличения» ртути (AMEEs - Atmospheric Mercury Enhancement Events – события увеличения атмосферной ртути). В период с 2001 по 2004 г. (рис. 9) для этих случаев были зарегистрированы близкие значения (2001 г. – 58, 2002 г. – 56 и 2003 г. – 54 случая соответственно) что говорит об отсутствии для арктического региона характерной тенденции к уменьшению

концентрации в приземном слое атмосферы. В тоже время при расчете длительности случаев увеличения ртути отмечается умеренная тенденция к росту (13 час/год) в летние сезоны (2001–2003 г.г.). Для всех других рассматриваемых сезонов (весна, осень и зима) отмечается динамично понижающая тенденция (-51 час/год, -34 час/год и -14 час/год соответственно). Максимальная длительность периодов увеличения ртути зарегистрирована для весны 2002 г. – 110 часов. В весенние сезоны для случаев истощения ртути наблюдается слабая тенденция к уменьшению (-16 случаев/год). Однако для длительности этих случаев зимой (2002–2003 г.г.) зафиксирована обратная тенденция (+60 час/год). Максимальная длительность истощения ртути зарегистрирована для весны 2003 г. – 111 часов, но максимальное количество случаев истощения (37) получено для весны 2002 г.

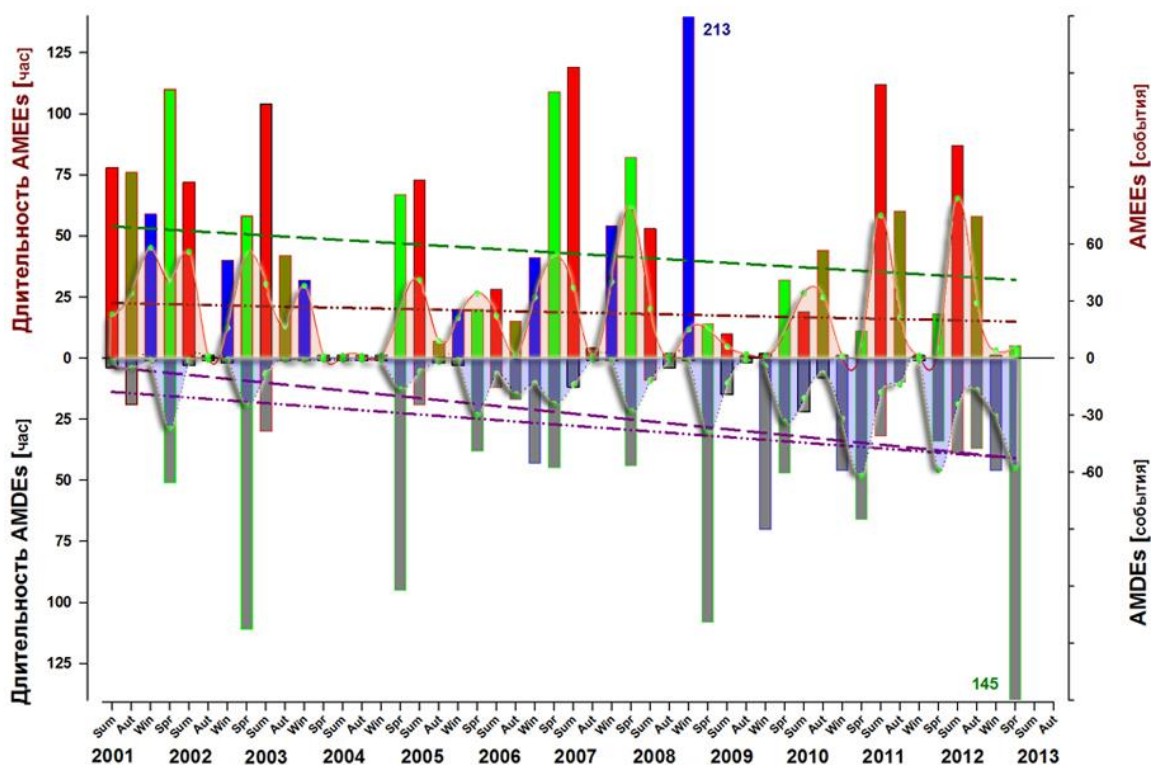


Рис. 9. Сезонная динамика AMDEs и AMEEs в период проведения мониторинга (2001 – 2013 г.г., синусоидальная выделенная область); длительность событий AMDEs и AMEEs (столбчатая диаграмма; красный цвет – лето, зеленый – весна, темно-желтый – осень, синий - зима); линейная аппроксимация тренда для длительности AMEEs для весеннего периода времени (зеленая штриховая линия) и AMDEs, для зимнего периода времени (фиолетовая штриховая линия), для всех случаев AMEEs (коричневая штрихпунктирная с двумя точками) и для всех случаев AMDEs (фиолетовая штрихпунктирная с двумя точками).

Для периода 2005–2010 г.г. (точка №2 - 2,5 км от побережья Карского моря) наблюдается тенденция с интенсивно протекающими процессами истощения ртути. Для весенних сезонов с 2005 по 2008 г. при регистрации событий увеличения ртути наблюдается тенденция к росту (18 случаев/год). В то же время весной 2008–2010 г.г. была зарегистрирована обратная тенденция к резкому уменьшению (-34 случая/год)

соответственно. Весной 2008 г. было зафиксировано максимальное количество событий увеличения ртути (80 случаев), что в 1,5 раза больше чем максимальное количество рассчитанное для аналогичного сезона в 2001 г. В то же время ход сезонных значений длительности этих событий для зимнего периода (2005–2008 г.г.) показывает тенденцию к интенсивному росту (60 час/год) и для 2008 г. была отмечена максимальная длительность (213 ч.) событий увеличения ртути. Максимальное значение для этого периода более чем в 4 раза превышает по длительности значение, полученное для периода 2001–2004 г.г. Для случаев истощения ртути ход среднегодовых значений в весенний период 2005–2010 г.г. показывает незначительную тенденцию к росту (3 случая/год). Максимальное количество случаев истощения зарегистрировано весной 2006 г. (30 случаев), а зимой 2008–2009 г.г. максимальную длительность (70 ч.). Также необходимо отметить интенсивное увеличение (32 час/год) длительности этих случаев в осенние сезоны (2008–2010 г.г.).

Для случаев увеличения ртути в летние сезоны с июня 2010 по июль 2013 г. отмечается тенденция к наиболее интенсивному росту (45 случаев/год). Максимальное количество случаев увеличения ртути (75 случаев) зафиксировано в летний сезон 2013 г., но максимальная продолжительность (112 часов) была получена для лета 2011 г. В то же время для случаев истощения ртути наблюдается тенденция к умеренному росту в весенние сезоны (7 случаев/год) и осенью (5 случаев/год). Для данного периода (2010–2013 г.г.) весной 2011 г. было рассчитано максимальное (62) количество случаев истощения. Однако, самое низкое среднее значение концентрации ртути ($0,84 \text{ нг/м}^3$) за весь 12 летний период наблюдений получено для весны 2013 г. Следует отметить, что для зим (декабрь – февраль 2012–2013 г.г.) впервые было зафиксировано увеличение событий истощения ртути и рассчитано максимальное значение (31 случай). Для весны 2013 г. обращает на себя внимание резкое увеличение (до 145 час.) длительности этих событий во время истощения. Это в 5 раз больше чем для аналогичного периода в 2006 г. (31 час.) и в 10 раз больше чем было зарегистрировано для периода мониторинга в точке №1 (2001–2004 г.г.). Данные (для периода 2010–2013 г.г.) подтверждают тенденцию к смещению процессов истощения ртути в область зимних сезонов, что приводит к возникновению дополнительного фактора осаждения ртути в различные экосистемы Арктики. Однако, для случаев увеличения ртути зарегистрировано смещение с весенних в летние сезоны. Также, зимой 2010–2013 г.г. отмечается тенденция к увеличению количества событий истощения ртути (в 8 раз возросла интенсивность по сравнению с предыдущими годами). Необходимо также отметить тенденцию к увеличению (более чем в 2 раза) случаев истощения ртути в летние и осенние сезоны (2010–2013 г.г.) относительно всего периода мониторинга (2001–2013 г.г.). Подобная динамика ртути может вызвать дополнительное,

как минимум двукратное увеличение поступления ртути в различные экосистемы российской Арктики.

Сезонная динамика количества случаев повышенных и пониженных значений концентрации ртути.

Результаты статистической обработки данных мониторинга (с июня 2001 по май 2013 г.г.) для двух диапазонов значений концентрации ртути ($\geq 1,8 \text{ нг/м}^3$ – повышенные и $< 1,0 \text{ нг/м}^3$ – пониженные концентрации) позволили выделить три временных периода.

Для первого периода с июня 2001 по март 2004 г. наблюдается тенденция, когда количество повышенных значений концентрации ртути остаётся практически на одном уровне (см. рис. 10), особенно в весенне-летние сезоны 2002–2003 г.г., что характерно для динамики ртути в средних широтах. Необходимо отметить, что зимой не были зафиксированы пониженные значения концентрации ртути. Однако весной 2002–2003 г.г. отмечается умеренная тенденция к незначительному уменьшению (-38 случаев/год) случаев с пониженными концентрациями. В то же время в весенние и осенние сезоны было зафиксировано незначительное количество пониженных значений концентрации ртути.

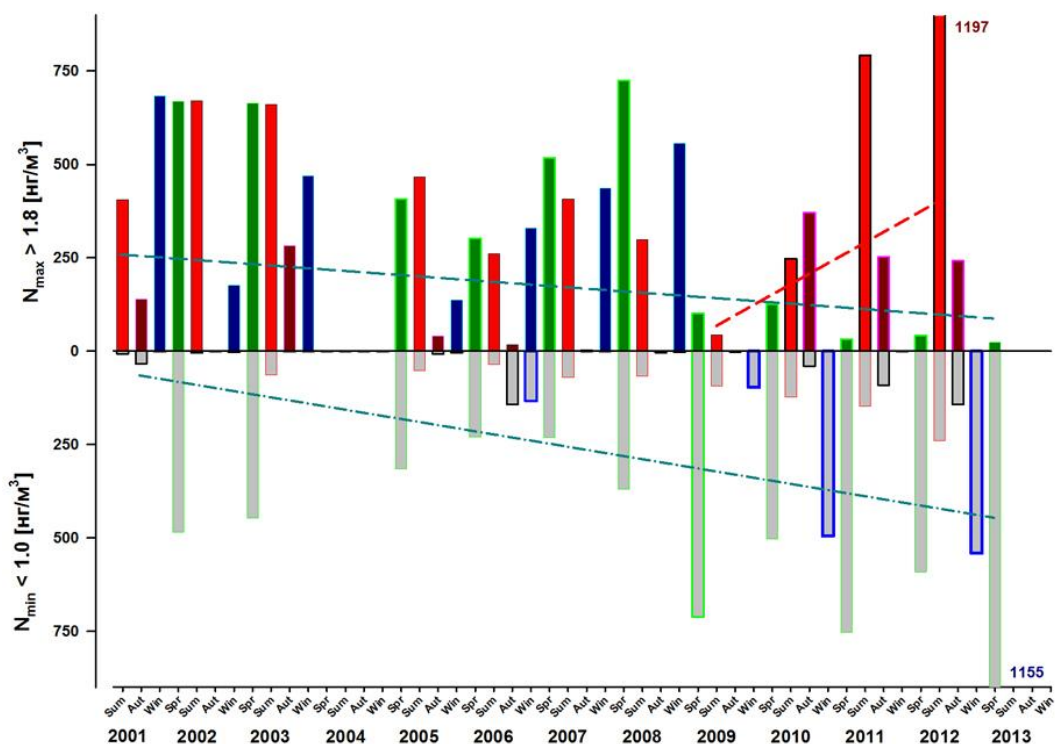


Рис. 10. Сезонная динамика повышенных ($N_{\max} - \geq 1,8 \text{ нг/м}^3$) и пониженных ($N_{\min} - < 1,0 \text{ нг/м}^3$) значений концентрации ртути в период проведения мониторинга (столбчатая диаграмма); количество значений N_{\max} и N_{\min} (столбчатая диаграмма; красный цвет – лето, зеленый – весна, темно-красный – осень, синий - зима); линейная аппроксимация тренда для максимальных (N_{\max}) в весенний период времени (зеленая штриховая линия) и пониженных (N_{\min}), в зимний период времени (темно-зеленая штриховая линия), и для повышенных (N_{\max}) в период с 2009 по 2012 г. (красная штриховая линия).

Второй и наиболее длительный период мониторинга (2005–2010 г.г.) можно охарактеризовать как более динамичный, чем предыдущий период. Для весенних сезонов 2005–2008 г.г. наблюдалось устойчивое увеличение (117 случаев/год) количества повышенных значений концентрации ртути. Следует отметить, что в 2008 г. было зарегистрировано максимальное (724) число таких случаев. Динамика в летние сезоны 2005–2009 г.г. показывает тенденцию к уменьшению (-81 случай/год) количества случаев повышенных значений. Однако для зим 2006–2009 г.г. прослеживается тенденция к их увеличению (137 случаев/год), достигая максимального количества случаев (556) в зимний сезон 2008–2009 г.г. В тоже время для пониженных значений концентрации ртути в весенние сезоны была зарегистрирована следующая динамика: 2005–2007 г.г. отмечается тенденция к уменьшению (-42 случая/год), однако в 2007–2010 г.г. зафиксирована тенденция к росту (116 случаев/год) этих событий. При этом в 2009 г. зарегистрировано максимальное (711) число таких случаев.

Третий период (с июня 2010 по июль 2013 г.г.) можно охарактеризовать как наиболее динамичный по отношению ко всему периоду мониторинга. Анализатор был установлен на расстоянии около 200 м от побережья Карского моря. В 2010–2012 г.г. основной повышающий тренд связан с регистрацией большого количества (475 случаев/год) повышенных значений концентрации ртути в летние сезоны. В 2012 г. было зарегистрировано максимальное (1197) для всего периода мониторинга количество подобных значений (рис. 10). Столь интенсивный рост связан с тем, что над местом проведения измерений прошло вулканическое облако активно действующих в это период времени вулканов Eyjafjallajökull и Grímsvötn (Исландия). Для весенних (-5 случаев/год) и осенних (-61 случай/год) сезонов отмечается тренд на понижение. В зимние месяцы повышенные значения концентрации ртути не регистрировались. Однако для периода (2010–2013 г.г.) отмечается резкое увеличение количества пониженных значений концентрации ртути и был зафиксирован повышающий тренд для следующих сезонов: весеннего (179 случаев/год), летнего (58 случаев/год), осеннего (52 случая/год) и зимнего (23 случая/год) соответственно. Весной 2013 г. для минимальных значений концентрации ртути зарегистрировано максимальное количество эпизодов (1155), что является абсолютным максимумом для всего периода мониторинга.

Межгодовая изменчивость концентрации ртути.

Результаты долговременного мониторинга ртути в атмосфере российской Арктики показали, что различные процессы, которые приводят к эффекту уменьшения концентрации ртути в атмосфере, связаны как с природными явлениями, так и с

антропогенной деятельностью. На (рис. 11) представлен ход среднегодовых максимальных, средних и минимальных значений концентрации ртути в период наблюдений с 2001 по 2013 г. в районе п. Амдерма. Средние значения концентрации ртути в приземном слое атмосферы составили: 2001–2004 г.г. – $1,65 \pm 1,91$ нг/м³; с апреля 2005 по июнь 2010 г.г. – $1,48 \pm 0,39$ нг/м³ и с июня 2010 по октябрь 2013 г.г. – $1,38 \pm 0,84$ нг/м³. Наблюдаемые концентрации элементарной ртути в приземном воздухе соответствуют глобальным фоновым уровням для арктических регионов ($1,5–1,7$ нг/м³) и наблюдается устойчивый тренд на уменьшение концентрации ртути. Аналогичная тенденция изменения концентрации ртути в атмосфере наблюдались на полярной станции «Алерт» (Канада) и полярной станции «Барроу» (США) на Аляске.

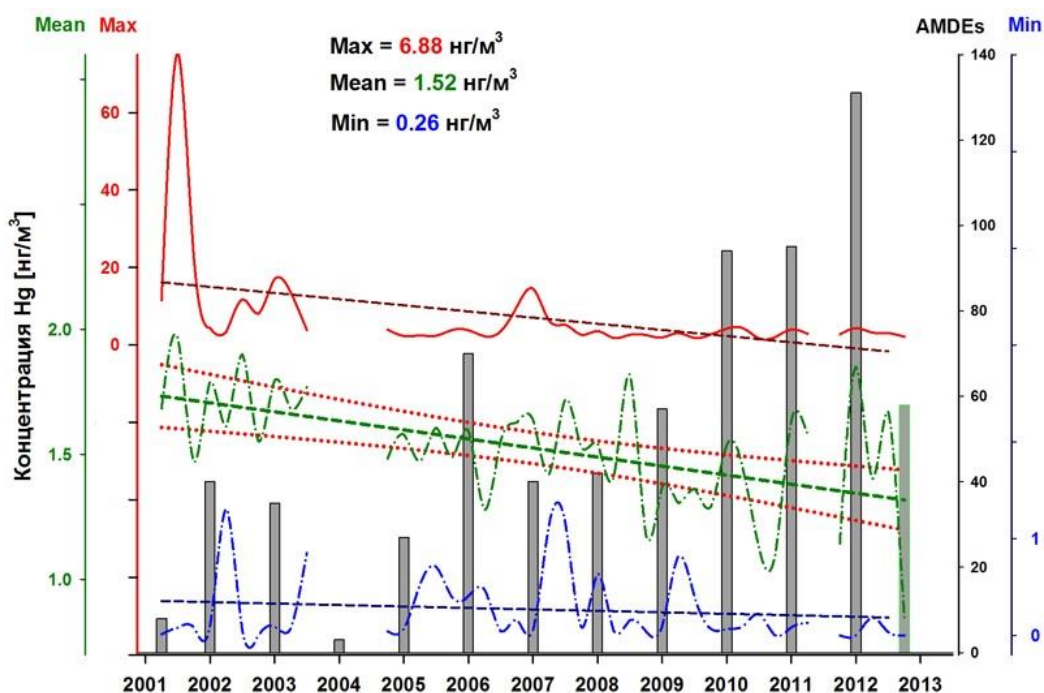


Рис.11. Среднегодовые максимальные, средние и минимальные значения концентрации ртути в период наблюдений с 2001 по 2013 г. в районе п. Амдерма.

Максимальное значение зарегистрировано для зимнего сезона 2001 г. ($75,5$ нг/м³). В летние периоды времени в 2003 г. и 2007 г. зарегистрированы повышенные значения концентрации ртути $17,1$ нг/м³ и $14,5$ нг/м³ соответственно. Особо следует отметить зарегистрированное летом 2013 г. повышенное значение концентрации ртути $94,5$ нг/м³ – наибольшее относительно всего долговременного периода наблюдений. Динамика средних значений концентрации ртути, рассчитанная для всего периода проведения мониторинга (с июня 2001 по май 2013 г.), показывает устойчивый отрицательный тренд ($-0,4$ нг/м³/период). Динамика минимальных значений показывает незначительный отрицательный тренд ($-0,17$ нг/м³/период). На фоне устойчивой тенденции уменьшения

концентрации ртути в приземном слое атмосферы и за счет увеличения числа случаев истощения происходит интенсивное осаждение ртути на подстилающую поверхность. Для этих событий рассчитан положительный тренд (11 AMDEs/2001–2013), что подтверждает изменения, происходящие в приземном слое атмосферы российской Арктики, вызванные климатическими факторами.

Максимальное количество случаев истощения ртути зарегистрировано в 2012 г. (131 случай), но необходимо учесть, что только за весенний период 2013 г. было зарегистрировано 58 случаев истощения и возможно в 2013 г. количество этих случаев будет зафиксировано большее, чем в 2012 г. Учитывая, что истощение является основным процессом вывода ртути из атмосферы, приходится констатировать на основании анализа полученных данных, что в последние годы резко возросло поступление ртути в растительность, и различные биологические объекты в высоких широтах Арктики. Для более полного понимания процессов глобального поступления ртути необходимо учитывать и вклад речных систем северного полушария, но эти процессы еще до конца не изучены и представлены только модельными оценками.

Динамика метеорологических параметров

Анализ долговременного ряда значений температуры воздуха в приземном слое атмосферы за весь период наблюдений (рис. 12,а) показал, что положительный тренд характерен как для средних значений температуры ($0,22^{\circ}\text{C}/\text{год}$), так и для минимальных значений ($0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$). В 5,5 раз быстрее происходит увеличение средних значений температуры относительно минимальных значений. Это свидетельствует о повышении температуры в приземном слое атмосферы российской Арктики.

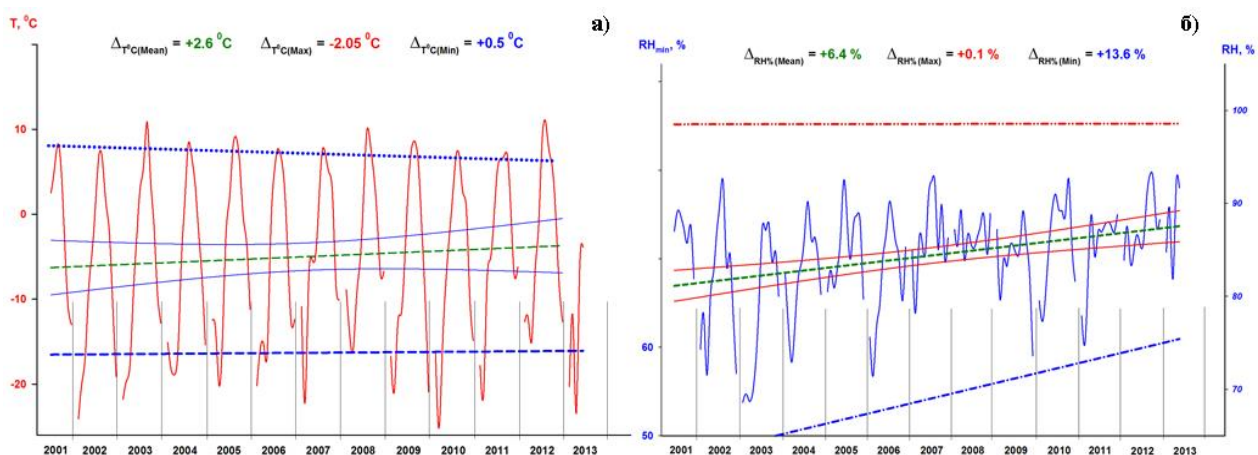


Рис. 12. (а) Временной ряд значений температуры ($T^{\circ}\text{C}$) и (б) влажности (RH%) (линейная аппроксимация тренда минимальных значений температуры – штриховые линии и влажности – штрих-пунктирные линии, линейная аппроксимация тренда максимальных значений температуры – точечная линия и влажности – штрих-пунктирные линии) для всего периода измерений, с июня 2001 по май 2013 г.

Следует отметить повышение температуры в 2012 г., и подобная динамика была зарегистрирована в 2003 г. и в 2008 г. Однако для максимальных значений температуры наблюдается отрицательный тренд ($-0,18^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Анализ временного ряда значений относительной влажности воздуха в приземном слое атмосферы показывает аналогичную тенденцию (рис. 12,б). Наблюдается положительный тренд для средних значений относительной влажности ($0,5\%/\text{год}$) и еще более интенсивное увеличение для минимальных значений. В то же время для максимальных значений относительной влажности зафиксирован незначительный положительный тренд. Таким образом, на протяжении всего периода наблюдений количество влаги в воздухе арктических районов увеличивается, что характерно для периодов потепления.

В пятой главе на основании расчета обратных траекторий с использованием модели HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) были определены области, где могли находиться вероятные источники загрязнения ртути, как в средних широтах, так и в области полярного круга. Для случаев, когда были зарегистрированы большие концентрации ртути в приземном слое атмосферы в период активной фазы извержения вулканов в Исландии (2011 и 2012 г.) были построены обратные траектории.

Анализ единичных случаев с высокими значениями концентрации.

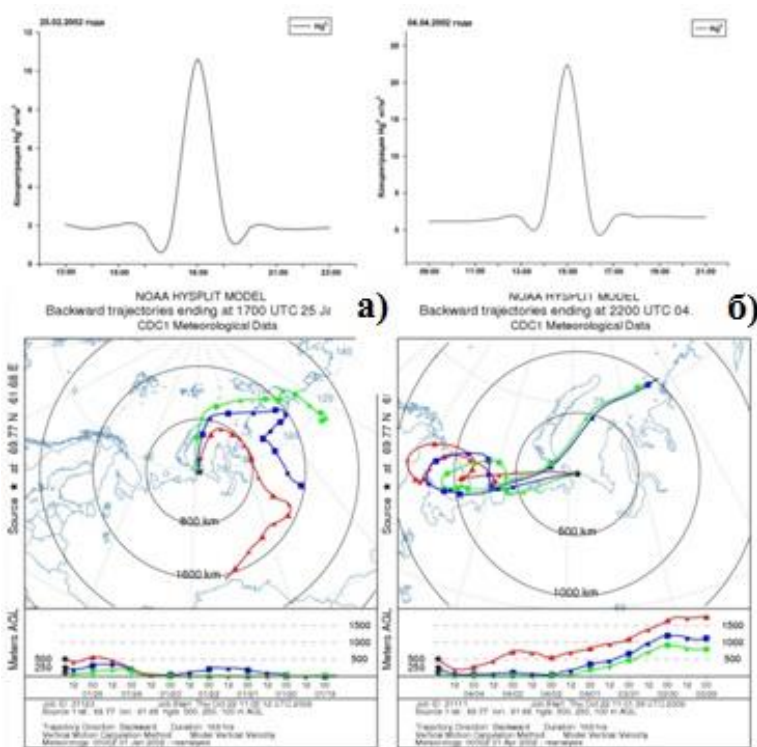


Рис. 13. Обратные траектории атмосферного переноса (рассчитанные с использованием HYSPLIT модели) для п. Амдерма для случаев повышенных концентраций ртути 25 января и 4 апреля 2002 г.

Используя многолетние данные измерения концентрации ртути в приземном слое атмосферы на полярной станции «Амдерма» и многолетние метеоданные, можно оценить вероятное местоположение антропогенных источников

ртути. Для этого применяется метод траекторного моделирования с расчетом обратных траекторий. Большие значения концентрации атмосферной ртути, для всего периода

наблюдений (2001–2013 г.г.), можно соотнести с переносом воздушных масс из областей, где расположены антропогенные или природные источники ртути (рис. 13). Они могут находиться как непосредственно за полярным кругом, так и в средних широтах. Оценка поступления ртути из южных широт, а также из антропогенных и природных источников в Арктику, была сделана на базе построения обратных траекторий с использованием метеорологических данных реанализа REANALYSIS CDC1, и модели HYSPLIT.

При проведении модельных оценок возможно исследование воздушного переноса от различных географических регионов до п. Амдерма, (Югорский п-ов). Цели состоят в том, чтобы определить: (i) Вероятность и продолжительность атмосферного переноса из различных потенциальных источников до станции измерения в районе п. Амдерма; (ii) Временное (год, сезонный, ежемесячно) и пространственное (на разных высотах в пограничном слое атмосферы) распределение атмосферной ртути в воздушном потоке во время переноса; (iii) Определение регионов и источников, которые вносят наибольший вклад в загрязнение арктических территорий; (iv) Роль воздушных масс в ежемесячном и ежегодном потоке, и роль атмосферной ртути в этом атмосферном переносе.

25 января 2002 г., были зарегистрированы повышенные значения концентрации ртути и для этого эпизода (рис. 13,а) были построены обратные траектории с различным вертикальным профилем. На основе траекторий можно предположить, что вероятный источник в данном случае, может находиться как в районе Норильского металлургического комбината, так и на п-ове Ямал, где происходит интенсивное сжигание попутного газа. Построенные обратные траектории для второго случая (4 апреля 2002 г.) (рис.13,б) показывают, что вероятный источник поступления ртути в Арктику может находиться на Кольском п-ове, где расположены промышленные предприятия.

Считается, что траектория атмосферного переноса представляет наиболее вероятную историю движения предполагаемого загрязнителя по истечении некоторого временного промежутка. Это можно представить как модельную оценку ветровой характеристики при перемещении воздушных масс как в случае с прогнозом, так и в случае построения обратной траектории перемещения для выбранной точки и местоположения.

Эпизоды вулканической деятельности.

Анализ данных долговременного мониторинга ртути показал, что в течение 2001 – 2013 г.г., за исключением последних трех лет (2010 – 2013 г.г.), наблюдается тенденция к снижению концентрации ртути в приземном слое (рис. 14,а). При этом среднее значение концентрации за весь период наблюдения составляет $1,49 \pm 0,45$ нг/м³. В то же время для

периода с 2010 по 2012 г. характерно увеличение концентрации и её значительная вариабельность, но в период с 2001 по 2009 г. наблюдалась устойчивая тенденция к уменьшению концентрации ртути.

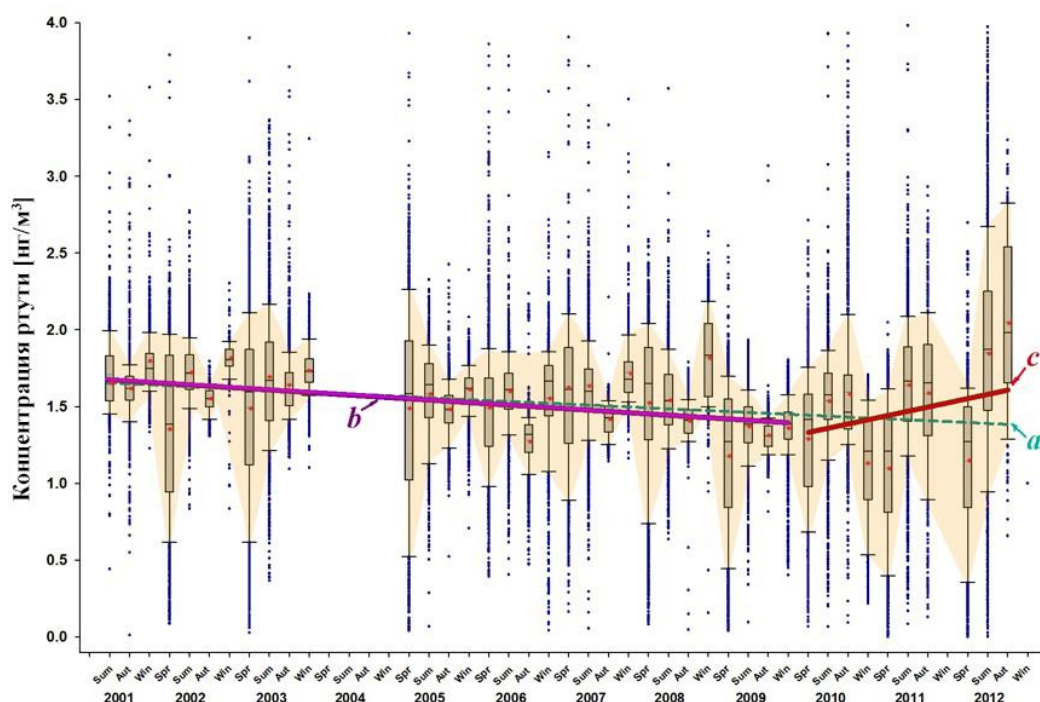


Рис. 14. Сезонная динамика долговременного мониторинга (2001 – 2012 г.г.) концентрации атмосферной ртути в приземном слое атмосферы на полярной станции; линейные тренды для периодов: (a) 2001 – 2012 г.г., (b) 2001 – 2009 г.г., и (c) 2010 – 2012 г.г.

Следует отметить, что наибольшее среднее значение концентрации ртути составило $1,67 \pm 0,31$ нг/м³ (2001 г.) и наименьшее $1,32 \pm 0,31$ нг/м³ (2009 г.). Для периода времени (2001–2009 г.г.) наблюдался отрицательный тренд концентрации ртути ($-0,04$ нг/м³/год) (рис. 14,b), однако, для периода (2010–2012 г.г.) наблюдается значительная положительная динамика поведения ртути в приземном слое атмосферы и высокая вариабельность (рис. 14,c). В 2010 г. среднее значение концентрации составило $1,43 \pm 0,4$ нг/м³, а в 2012 г. - $1,55 \pm 0,7$ нг/м³ соответственно. Впервые за последние годы для периода времени (с 2010 по 2012 г.) зарегистрирован положительный тренд ($+0,04$ нг/м³/год). Данный факт объясним, если принять во внимание, что вулканическое облако как в одном, так и в другом случае (извержение вулкана Eyjafjallajökull (2010 г.) и вулкана Grímsvötn (2011 г., Исландия)) прошло над местом проведения мониторинга ртути. Соответственно, зарегистрированное увеличение концентрации ртути является следствием дальнего атмосферного переноса в полярную область российской Арктики вулканического облака состоящего из газов и аэрозоля. Для детального изучения этого явления были проанализированы полученные данные во время активных фаз извержений

вулканов Eyjafjallajökull и Grímsvötn (Исландия). Отметим что в период извержения вулкана Eyjafjallajökull с марта по май 2010 г. наблюдалось постепенное повышение средних значений концентрации ртути ($0,22 \text{ нг/м}^3/3 \text{ мес}$) (рис. 15,б), что в четыре раза выше при сравнении с тем же периодом для 2009 г., ($-0,66 \text{ нг/м}^3/3 \text{ мес}$) (рис. 15,а).

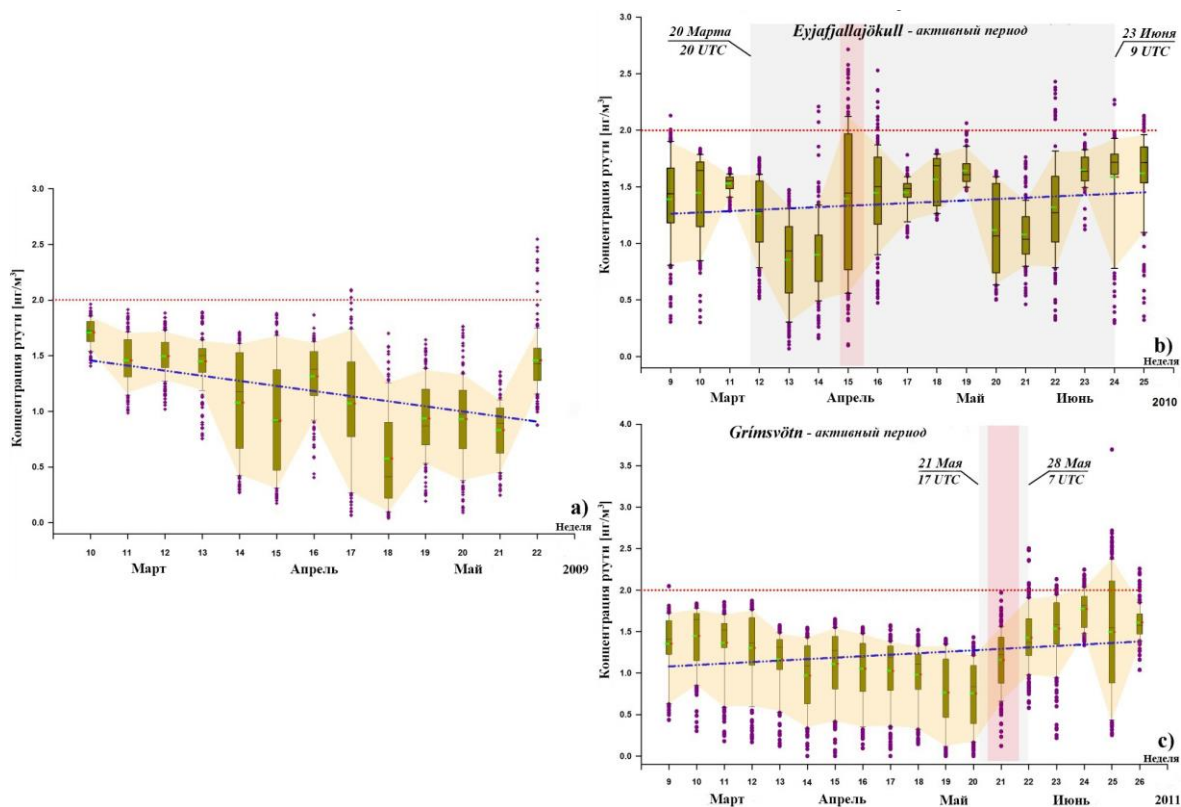


Рис. 15. Динамика поведения концентрации ртути за период (март - май): а) 2009 г., б) 2010 г., в) за период март - июнь 2011 г. в периоды активных фаз извержения вулканов: б) Eyjafjallajökull, в) Grímsvötn (серые прямоугольники) и в период атмосферного переноса вулканического облака над Югорским полуостровом (красные прямоугольники);

В то же время существует общая тенденция повышения концентрации ртути в весенний период времени, однако до 2010 г. подобной положительной динамики не наблюдалось. Также с апреля по май 2010 г. (рис.15,б) была зарегистрирована высокая вариабельность, $\sigma = \pm 0,52 \text{ нг/м}^3$. Анализ данных (с 2001 по 2012 г.) показал, что в апреле наибольший положительный тренд зафиксирован в 2010 г., ($+0,92 \text{ нг/м}^3/\text{мес}$) и похожая динамика наблюдалась в 2005 г., а наибольший отрицательный тренд рассчитан для 2003 г., ($-0,88 \text{ нг/м}^3/\text{мес}$). Возрастание концентрации ртути было отмечено в мае - июне 2011 г. (рис. 15,с). Положительный тренд для этого периода времени составил $+0,49 \text{ нг/м}^3/\text{мес}$ (наибольший в течение всего периода наблюдений), в то же время была зафиксирована и высокая вариабельность $\sigma = \pm 0,53 \text{ нг/м}^3$, а для 2006 г. был рассчитан наибольший отрицательный тренд ($-0,15 \text{ нг/м}^3/\text{мес}$). Согласно полученным данным можно предположить, что повышенные концентрации ртути, наблюдаемые на полярной станции

«Амдерма» в период с апреля по май 2010 г. являются следствием дальнего атмосферного переноса вулканического облака. Оно могло образоваться во время активной фазы извержения вулкана Eyjafjallajökull (рис. 15,б; серый прямоугольник) и состоять из газообразных компонентов и аэрозольных фракций. Повышение концентрации ртути в мае-июне 2011 г. также являются следствием переноса облака образовавшегося в период активной фазы извержения вулкана Grímsvötn (рис.17,в; серый прямоугольник).

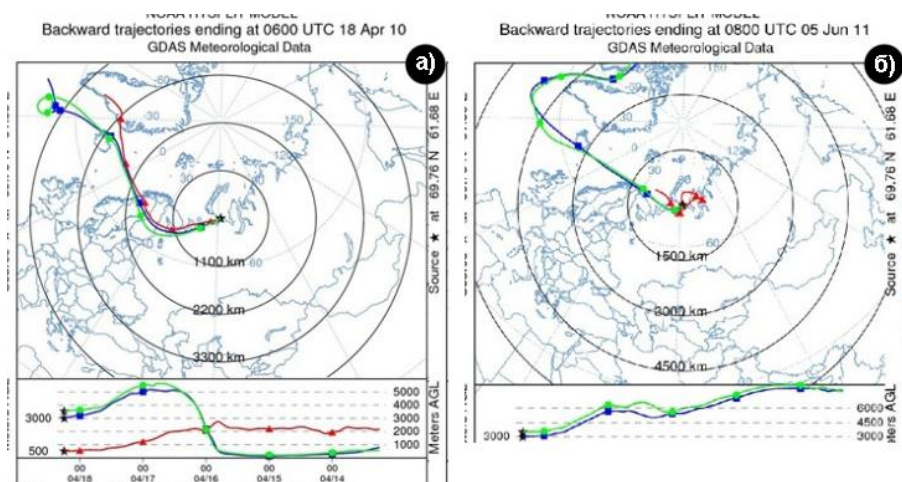


Рис. 16. Обратные траектории атмосферного переноса (модель NOAA HYSPLIT) приходящие в точку мониторинга ртути (а) 18 апреля 2010г. (Eyjafjallajökull), (б) 5 июня 2011г. (Grímsvötn), связанные с активной фазой извержения вулканов в Исландии.

Для периодов времени, когда регистрировались повышенные концентрации, были построены обратные траектории, что дает возможность определить происхождение воздушных потоков приходящих к месту измерения атмосферной ртути (рис. 18 а,б). Рассчитанные обратные траектории показывают, что источником поступления ртути в полярную область российской Арктики и вследствие этого регистрация высоких концентраций могут являться действующие вулканы в Исландии. Следовательно, осаждаемая на частицах аэрозоля ртуть может повлиять на увеличение концентрации ртути как в месте проведения измерений (полярная станция «Амдерма») так и в целом за полярным кругом северного полушария.

Регистрация высоких концентраций ртути в 2010 г. и 2011 г. определялась дальним атмосферным переносом в основном с северо-западного направления, однако необходимо отметить, что в этом секторе российской Арктики нет потенциальных источников ртути (рис. 16). Следовательно, в арктический регион могло происходить поступление различных форм ртути только за счет дальнего атмосферного переноса в период активной фазы извержения вулканов Eyjafjallajökull и Grímsvötn, что и было впервые зарегистрировано в процессе проведения долговременного мониторинга на полярной станции «Амдерма».

ВЫВОДЫ

1. Устойчивая тенденция уменьшения концентрации ртути в приземном слое атмосферы зафиксирована в российской Арктике, с $1,67 \pm 0,3$ нг/м³ (2001 г.) до $1,23 \pm 1,3$ нг/м³ (2013 г.). Это также характерно и для международных полярных станций по мониторингу ртути в северном полушарии. Такая тенденция может быть связана с уменьшением доли сжигаемого ископаемого топлива, и с изменением климатических условий в Арктике.
2. Анализ многолетних (2001–2013 г.г.) данных мониторинга показал, что зафиксированы случаи истощения ртути на полярной станции «Амдерма». Это коррелирует с наблюдениями, полученными на Арктических международных полярных станциях «Алерт» (Канада) и «Ню Олесунн» (Норвегия). Зарегистрировано увеличение интенсивности истощения ртути (для 2010–2013 г.г. относительно периода 2001–2010 г.г.): в 2 раза для весеннего, в 3 раза для летнего и в 8 раз для зимнего периода. В тоже время отмечается сезонное смещение интенсивности истощения ртути с весеннего в зимний а для случаев увеличения ртути с весеннего в летний сезон. Следует отметить что, подобные процессы могут проявляться за счет изменений климатических условий происходящих в российской Арктике.
3. Зафиксировано изменение концентрации и интенсивности процессов истощения ртути при различном удалении анализатора от береговой линии Карского моря. Подтверждено, что процессы истощения ртути активно протекают только в узкой области вдоль береговой полосы арктических морей с незначительным расширением этой зоны (около 10 км), как в сторону суши, так и в сторону открытого моря.
4. Показано, что метеорологические величины, такие как температура воздуха, относительная влажность и скорость ветра существенно влияют на процессы истощения ртути в приземном слое атмосферы как в весенне-летний сезон во время максимальной солнечной активности, так и в период полярной ночи при полном отсутствии солнечной радиации и фотохимических реакций.
5. Впервые в российской Арктике зарегистрировано влияние природных источников на динамику ртути за счет дальнего атмосферного переноса. Применение метода траекторного моделирования с расчетом обратных траекторий подтверждает предположение о том, что увеличение концентрации ртути в приземном слое атмосферы в 2010 г. и 2011 г. было вызвано прохождением вулканического облака через Югорский п-ов, в период интенсивного извержения вулканов Eyjafjallajökull и Grímsvötn (Исландия).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях перечня ВАК РФ по теме диссертации:

1. Коноплев А.В., **Панкратов Ф.Ф.**, Рычков А.М. Уменьшение концентраций ртути в атмосфере российской Арктики весной // Метеорология и Гидрология. – 2005 г., № 9., с. 50 - 54.
2. **Панкратов Ф.Ф.**, Махура А., Кац О.В., Коноплев А.В. Анализ данных долговременного мониторинга концентрации атмосферной ртути и метеовеличин на полярной станции Амдерма // Метрология и гидрология. – 2013 г., № 6., с. 56 - 67.
3. **Pankratov F.**, Mahura A., Reiersen L.O., Steffen A., Wilson S. Elevated atmospheric mercury at the Russian polar station Amderma during Icelandic volcanoes' eruption // Journal of Atmospheric Environment. – 2013 (в редакции).

Другие публикации:

4. Коноплев А.В., **Панкратов Ф.Ф.** Мониторинг элементарной ртути в атмосферном воздухе российской Арктики // Экспедиционная деятельность в рамках Международного Полярного Года 2007/08. Экспедиция 2008 г. – Санкт-Петербург, ААНИИ. – 2009 г. – Том 2., с. 120 - 121.
5. **Панкратов Ф.Ф.**, Коноплев А.В. Зависимость событий истощения атмосферной ртути на полярной станции Амдерма от сезонных изменений метеорологических параметров // Материалы международного симпозиума «Ртуть в биосфере: Эколого-геохимические аспекты», 7-9 сентября 2010 г. – М., ГЕОХИ РАН. – 2010 г., с. 61 – 66.
6. Коноплев А.В., **Панкратов Ф.Ф.** Долговременный мониторинг атмосферной ртути в атмосферном воздухе Российской Арктики // Материалы международного симпозиума «Ртуть в биосфере: Эколого-геохимические аспекты», 7-9 сентября 2010 г. – М., ГЕОХИ РАН. – 2010 г., с. 114 – 119.
7. **Панкратов Ф.Ф.**, Коноплев А.В. Мониторинг ртути в атмосферном воздухе российской Арктики // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2010 г. – М., Росгидромет, 2011 г., с. 175 - 176.
8. **Панкратов Ф.Ф.** Мониторинг ртути в атмосферном воздухе российской Арктики // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2011 г. – М., Росгидромет, 2012 г., с. 236 - 239.
9. **Панкратов Ф.Ф.** Мониторинг ртути в атмосферном воздухе российской Арктики // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2012 г. – М., Росгидромет, 2013 г., с. 166 - 168.

Материалы и тезисы конференций

10. **Панкратов Ф.Ф.** Коноплев А.В. Исследование эффекта уменьшения концентрации атмосферной ртути в атмосфере российской Арктики // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, 28 июня – 6 июля: Труды конференции. – г. Томск, ENVIROMIS, 2008 г. http://www.scert.ru/enviromis/2008/presentation/Presentation/Conference/Session_7_Environment_and_Climatic_Change_Assessment_and_Modeling/Short_reports/4-Pankratov.pdf

11. Коноплев А.В., **Панкратов Ф.Ф.** Исследование эффекта уменьшения атмосферной ртути в атмосфере российской Арктики // Научная конференции «Вклад России в МПГ», 2-8 октября 2008 г.: Тез. докл. – г. Сочи, 2008., с. 98.
12. **Панкратов Ф.Ф.**, Коноплев А.В. Влияние температуры на уменьшение концентрации атмосферной ртути весной в атмосфере российской Арктики // Сборник трудов по материалам молодежной школы-конференции в рамках III Международного Полярного Года (МПГ) «Изменение климата как глобальная экологическая проблема» 11-14 ноября 2008. СПб., изд. РГГМУ, 2008 (УДК 551.583: 502.1 (063)).
13. **Панкратов Ф.Ф.**, Махура А., Кац О.В., Коноплев А.В. Динамика элементарной ртути в приземном слое атмосферы российской Арктики и во время извержения вулкана Eyjafjallajökull в Исландии // Школа молодых ученых и международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде “CITES-2011”, 3 – 12 июля 2011 г.: Тез. докл. и постер. – г. Томск, 2011. – <http://www.scert.ru/conferences/cites/2011/presentation/ConferenceEng.html>
14. Konoplev A., **Pankratov F.**, Lars-Otto R., Steffen A., Simon W. Monitoring of mercury of ambient air of the Russian Arctic impact of Eyjafjallajökull volcano eruption // Synopsis and Poster 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, July 24-29, 2011. Halifax, Nova Scotia, Canada: RS1-P2, P. 168.
15. **Pankratov F.**, Mahura A., Katz O., Konoplev A. Long-term continuous monitoring of GEM in the ambient air on the Russian Arctic. Impact of the Eyjafjallajökull and Grimsvötn volcanic eruptions in Iceland. // Synopsis and Poster, Boundary Layers in High Latitudes: Physical and Chemical Processes Including Atmosphere-Ice Chemical Interactions (AICI). European Geosciences Union General Assembly 2012. April 22-27, 2012, Vienna, Austria: Abstract. http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/poster_programme/9022/XY130/EGU2012-10377
16. **Pankratov F.**, Mahura A., Lars-Otto R., Steffen A., Simon W. Impact of Icelandic volcanoes eruptions on background mercury concentration levels in the Russian Arctic // Synopsis and Poster 11th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, 28th July -2nd August, 2013. Edinburg, Scotland: Abstract.

Публикации не по теме диссертации:

17. Попов В.Е., Моршина Т.Н., Семёнова И.В., **Панкратов Ф.Ф.**, Дородонова Ю.А., Самолазова А.В. Оценка минеральных ресурсов Калужской области в качестве компонентов органико-минеральных сорбентов для реабилитации загрязненных ¹³⁷Cs территорий // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. – Калуга: Издательский дом «Эйдос». – 2007. – Вып. 12, с. 364-377. <http://www.science-kaluga.ru/books/?content=article&id=187>
18. Семенова И.В., **Булгаков А.А.**, Коноплев А.В., Попов В.Е., Алексева Л.Б., **Панкратов Ф.Ф.** Оценка выноса загрязняющих веществ с водосбора реки Печеры в Северный Ледовитый океан при возможных изменениях климата // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, 28 июня – 6 июля: Труды конференции. – г. Томск, ENVIROMIS, 2008. http://www.scert.ru/enviromis/2008/presentation/Presentation/Conference/Session_5.Hydrology_and_Climate/Oral_reports/4-Semenova.pdf
19. Семенова И.В., Коноплев А.В., Марков М.Л., Попов В.Е., **Панкратов Ф.Ф.** Оценка выноса загрязняющих веществ в Северный Ледовитый океан с водосбора реки Северная Двина // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды / Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010 г. – Том II., с. 200–217.

20. Konoplev A., Gusarov A., Il'icheva N., Lee S.D., Maslova K., **Pankratov F.**, Popov V., Stepina I. Fate and transport of radiocesium, radiostronceum and radiocobalt in urban building materials // INSINUME-2012, 6th International symposium on in situ nuclear metrology as a tool for radioecology, Brussels, Belgium, June 11-15, 2012. Abstract. – Brussels, 2012., P. 45.
21. Maslova K., Stepina I., Konoplev A., Popov V., Gusarov A., **Pankratov F.**, Lee S.D., Il'icheva N. Fate and transport of radiocesium, radiostronceum and radiocobalt in urban building materials // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.01.01>

Автореферат

Фидель Федорович Панкратов

**ДИНАМИКА АТМОСФЕРНОЙ РТУТИ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ДОЛГОВРЕМЕННОГО МОНИТОРИНГА**

Подписано в печать 21.11.2013.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Зак. № 136.

Отпечатано