

*На правах рукописи*



**Панкратов Фидель Федорович**

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

**Специальность 25.00.36 – Геоэкология**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

г. Москва  
– 2014 –

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

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник центра исследований и  
разработки Датского метеорологического  
института,  
Махура Александр Григорьевич

**Официальные оппоненты:**

доктор географических наук, заведующий  
лабораторией исследования последствий изменения  
климата ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД»,  
Шерстюков Борис Георгиевич

кандидат географических наук, заведующий  
лабораторией программного сопровождения и  
информационного обеспечения, старший научный  
сотрудник ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН»,  
Громов Сергей Аркадьевич

**Ведущая организация:**

Московский государственный университет им.  
М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита диссертации состоится « 5 » июня 2014 г. в 12 часов на заседании диссертационного Д002.049.01 ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» по адресу: РФ, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20-Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН». Автореферат размещен на сайте ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» (<http://www.igce.ru/category/dissertations>) и на сайте ВАК.

Автореферат разослан « 5 » мая 2014 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20-Б, ученому секретарю диссертационного совета Д002.049.01.

E-mail: [gmchernogaeva@gmail.com](mailto:gmchernogaeva@gmail.com); [semenov@igce.ru](mailto:semenov@igce.ru). Факс: 8-499-160-08-31.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор географических наук,  
профессор

Г.М. Черногаева

## 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, что приводит к интенсивному осаждению 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:**

Проведения долговременного мониторинга атмосферной ртути в российской Арктике и получение систематических данных высокого временного разрешения в рамках международной программы АМАП по мониторингу стойких загрязняющих веществ в Арктическом регионе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- Анализ динамики элементарной газообразной ртути (ЭГР) в приземном слое атмосферы российской Арктики на основе полученных данных долговременного мониторинга;
- Оценка влияния суммарной солнечной радиации и метеорологических величин (температуры, относительной влажности, скорости ветра) на поведение элементарной ртути во время событий истощения;
- 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:

- на полярной станции «Амдерма» получен долговременный (12 летний период наблюдений) ряд значений концентрации ЭГР в приземном слое атмосферы;
- зарегистрированы процессы истощения ртути, что подтверждает существование подобных явлений во всех полярных регионах в прибрежной полосе арктических морей Северного полушария;
- были зафиксированы процессы истощения ртути не только в весенние сезоны, но и в

период полярной ночи без протекания photoхимических реакций. Необходимо также отметить наличие процессов истощения ртути в летние сезоны при максимальной интенсивности суммарной солнечной радиации;

- проведено сопоставление полученных результатов долговременного мониторинга с данными, полученными на других международных полярных станциях «Алерт» (Канада) и «Нью Олесуннд» (Норвегия). Выяснено, что для этих точек долговременного мониторинга наблюдаются идентичные процессы истощения ртути в весенние сезоны.

- показано, что динамика ртути в приземном слое атмосферы при проведении измерений в 9 км полосе прибрежной зоны зависит от расстояния до береговой черты Карского моря;

**Научная и практическая значимость работы.** Впервые на полярной станции «Амдерма» освоена и внедрена современная методика пробоотбора и определения концентрации ЭГР на базе анализатора «Tekran 2537A». Полученные результаты измерений передаются в АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme – Программа арктического мониторинга и оценки) и могут быть использованы в модельных оценках для расчета поступления ртути в экосистемы Арктики. Данные о повышенных значениях концентрации ЭГР будут применяться при определении вероятных источников загрязнения находящихся как за полярным кругом, так и в других регионах Северного полушария. Зарегистрированы повышенные значения концентрации ЭГР в периоды извержения вулканов в Исландии (весной 2010 г. и 2011 г.). Для разных сезонов,очных и дневных периодов времени, проведен статистический анализ долговременных рядов концентрации ртути в российской Арктике, что позволило впервые оценить степень влияния метеорологических величин и суммарной солнечной радиации на динамику ЭГР в приземном слое атмосферы.

#### **Автор выносит на защиту:**

1. Зарегистрирована тенденция к уменьшению концентрации элементарной газообразной ртути в приземном слое атмосферы по результатам проведения долговременного мониторинга в российской Арктике.
2. Наиболее интенсивные процессы истощения ртути наблюдаются в прибрежной полосе Карского моря, особенно в холодный период года.
3. Сезонное изменение циркуляции атмосферы приводит к повышению значений концентрации ртути в приземном слое воздуха для теплого периода времени.
4. На основе результатов модельных расчетов установлено влияние дальнего атмосферного переноса активной вулканической деятельности в Исландии на концентрацию атмосферной ртути в российской Арктике.

#### **Личный вклад автора.**

Организация, постановка задач и выполнение программы измерений на полярной станции «Амдерма», освоение и локализация новой методики измерения элементарной ртути с использованием измерительного комплекса на базе ртутного анализатора “Tekran 2537A”, техническое обслуживание, настройка анализатора, проведение ручной калибровки и сбор данных измерений ЭГР и их обработка. Статистический анализ данных концентрации ЭГР и метеорологических величин, 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 ЭГР 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 ENVIRONMIS (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, 9<sup>th</sup> Mercury Emissions from coal (MEC)” (St.Petersburg, 2012); Международной конференции “Mercury as a Global Pollutant”, (Edinburg, 2013); Международной конференции “European Geosciences Union, General Assembly 2014, (Vienna, Austria, 2014).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 2 статьи в рецензируемых журналах, 6 публикаций и 8 тезисов докладов в трудах международных конференций. Не по теме диссертации опубликована 1 статья в рецензируемом журнале 2 публикации и 2 тезисов докладов в трудах международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, приложения и заключения. Материал изложен на 142 страницах, содержит 86 иллюстраций и список литературы из 148 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. Так же показано долевое соотношение вклада различных источников в глобальную антропогенную эмиссию ртути. Пространственное распределение концентрации ЭГР в Северном полушарии, для периода времени с 2001 по 2005 г. представлено в таблице №1.

**Таблица 1.** Среднегодовые концентрации ( $\text{нг}/\text{м}^3$ ) общей газообразной ртути в Северном полушарии, (доклады Академии Наук, т 322, 2002 г.).

Район измерения	Координаты	2001	2002	2003	2004	2005	Источник
Andoya, Norway	$69^0\text{N}, 16^0\text{E}$				1.64		IVL, 2010
Pallas, Finland	$68^0\text{N}, 24^0\text{E}$	1.41	1.48	1.57	1.49	1.63	IVL, 2010
Ny-Alessund, Norway	$79^0\text{N}, 12^0\text{E}$	1.61	1.63	1.63	1.52	1.61	IVL, 2010
Амдерма, Россия	$69^0\text{N}, 61^0\text{E}$	1.65	1.73	1.71	1.52	1.54	Панкратов Ф.Ф., 2013
Севморпуть	$58^0\text{N} - 173^0\text{E}$	0.32					А.Н., т.322, 2002
Карское море			0.89				А.Н., т.322, 2002
Баренцево море		0.61					А.Н., т.322, 2002

**Во второй главе** описаны методы и средства измерения, применение автоматической и ручной калибровки, оценка погрешности измерений во время проведения мониторинга. 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 ЭГР в приземном слое атмосферы, расстояние от входного фильтра до поверхности земли составляло от 5 до 8 м.

В состав измерительного комплекса входит следующее оборудование (рис.1):

- Генератор паров ртути «Tekran 2505»;
- Генератор чистого воздуха «Tekran 1100»;
- Приставка «Tekran 1120»;
- Газовый анализатор атмосферной ртути «Tekran 2537A».

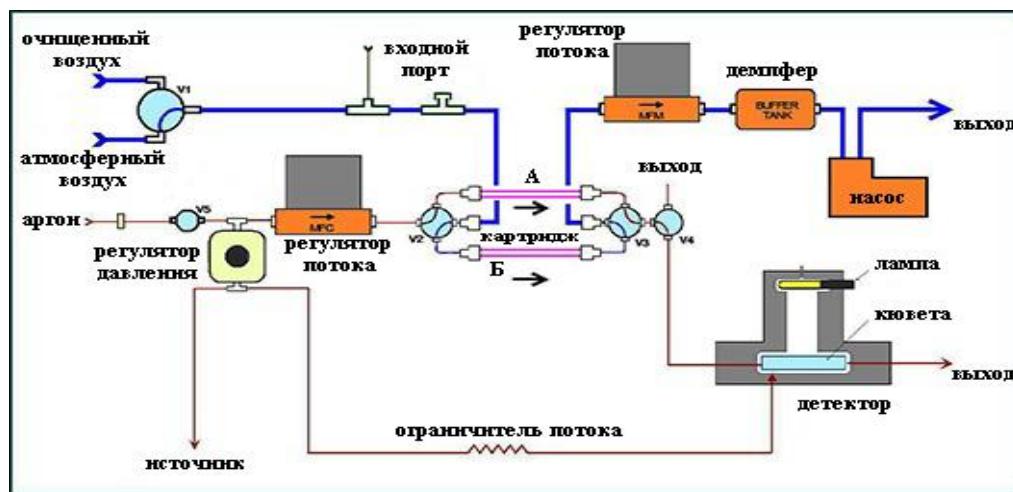


**Рис. 1.** Комплекс оборудования для автоматического измерения содержания ртути в воздухе, установленный на полярной станции «Амдерма» (Россия); Газовый анализатор «Tekran 2537A» используется для измерения (с ультразвуковым пределом обнаружения) концентрации газообразной ртути в приземном слое атмосферы.

Прибор имеет следующие характеристики: высокое временное разрешение (от 5 мин. до 200 часов); объем

прокаченного воздуха от 0,7 до 1,5 л/мин; предел чувствительности  $0,11 \text{ нг}/\text{м}^3$ ; погрешность измерения составляет  $\pm 10\%$ .

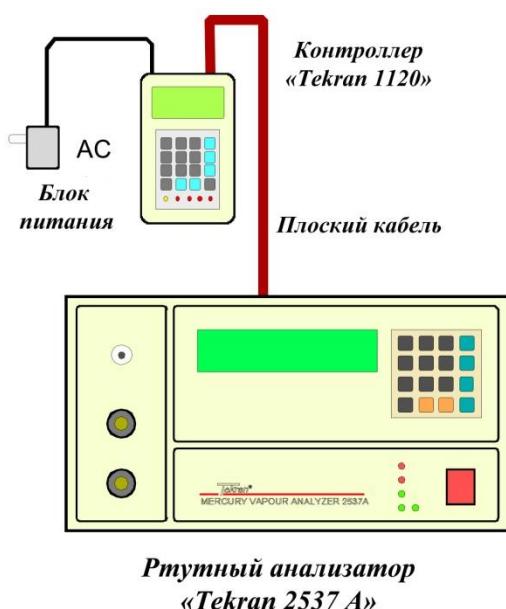
Для сорбции ртути используется ловушка из золота высшей пробы; автоматическая внутренняя калибровка и полная автономность во время процесса измерения ртути. После периода накопления на золотом сорбенте картриджа «A» или «B» амальгамированная ртуть термически десорбируется и количественно определяется с помощью атомно-флуоресцентного спектрометра холодного пара (рис. 2). Измерения ртути в атмосферном воздухе проводились каждые 30 минут для одного из двух каналов.



**Рис. 2.** Структурная схема компоновки основных узлов анализатора Tekran® 2537A.

После контроля качества полученных данных о концентрации ртути, рассчитывается среднее значение между двумя последовательными измерениями в двух каналах (среднее за 1 час измерений) и среднесуточные концентрации ртути в воздухе. Пробоотбор, пробоподготовка и метод анализа применяемый для систем мониторинга атмосферной ртути с использованием автоматизированных комплексов реализован на основе методического руководства EPA, Method 1669. Данная методика была освоена и адаптирована (изменен период проведения автоматической калибровки и установлен 30 мин период для сорбции атмосферной ртути) для измерения фоновых концентраций элементарной ртути на полярной станции «Амдерма». Достоверность результатов при измерении фоновых концентраций ЭГР в значительной мере зависит от правильного пробоотбора и инструментального измерения на базе метода холдного пара с атомно-флуоресцентной регистрацией детектируемого сигнала (рис.2).

При измерении фоновых концентраций ЭГР в значительной мере зависит от правильного пробоотбора и инструментального измерения на базе метода холдного пара с атомно-флуоресцентной регистрацией детектируемого сигнала (рис.2).



**Рис. 3.** Блок-схема подключения контроллера «Tekran 1120» к ртутному анализатору «Tekran 2537A».

Одной из основных проблем при проведении мониторинга фоновых концентраций ртути в атмосфере является калибровка. Существующие

стандарты с пониженными концентрациями ртути ( $\text{нг}/\text{м}^3$ ) не отвечают предъявляемым требованиям по стабильности и соответственно не могут использоваться как калибровочные образцы. Применяемая методика для проведения калибровки предполагает использование генератора паров ртути «Tekran 2505», который представляет собой портативный блок с находящейся в термоконтейнере ртутью и используется в тех случаях, когда необходимо ввести в аналитическую систему точное количество газовой ртутно-воздушной смеси с известной массовой концентрацией ртути. Помимо внешнего калибровочного источника в анализатор встроен внутренний источник паров ртути. Контроллер стандартных добавок «Tekran 1120» (рис. 3) позволяет запрограммировать время для инжекции определенной

массы ртути из внутреннего источника в отбираемую пробу атмосферного воздуха. Помимо ввода определенного количества ртути контроллер «Tekran 1120» обеспечивает подачу в измерительную систему очищенного воздуха, переключая систему электронных клапанов с внутреннего источника ртути на генератор чистого воздуха «Tekran 1100».

Для обеспечения методической процедуры (обеспечение/контроль качества), как правило, используют расчетные способы определения введенного количества ртути во время ручной и автоматической калибровки. Одной из таких основных процедур является расчёт площади пика (**A**), при автоматическом вводе определенной массы ртути во время проведения автоматической калибровки. Полученные данные за последние три цикла проведенной авто-калибровки используются при расчете среднего значения концентрации ртути перед проведением последующей калибровки:

$$A = (S_{SPAN_{\text{сред.}}} - S_{ZERO_{\text{сред.}}}) / 120 \text{ с} \quad (1)$$

**A** – расчетное значение площади пика (площадь/с);

$S_{SPAN_{\text{сред.}}}$  – среднее значение площади пика во время инжекции ртути (площадь/с);

$S_{ZERO_{\text{сред.}}}$  – среднее значение площади пика во время прокачки очищенного воздуха (площадь/с).

При расчете среднего значения используются 6 предыдущих значений концентрации ртути, полученные в период проведения ручной калибровки.

Следовательно, может быть рассчитано значение (**B**), которое связано с полученными значениями концентрации ртути следующим соотношением:

$$B = (S(P)_{SPAN_{\text{сред.}}} - S(P)_{ZERO_{\text{сред.}}}) / M_{Hg_{\text{сред.}}} \quad (2)$$

**B** – расчетное значение площади пика (площадь/пг);

$S(P)_{SPAN_{\text{сред.}}}$  – среднее значение площади пика при ручной калибровке (площадь/пг);

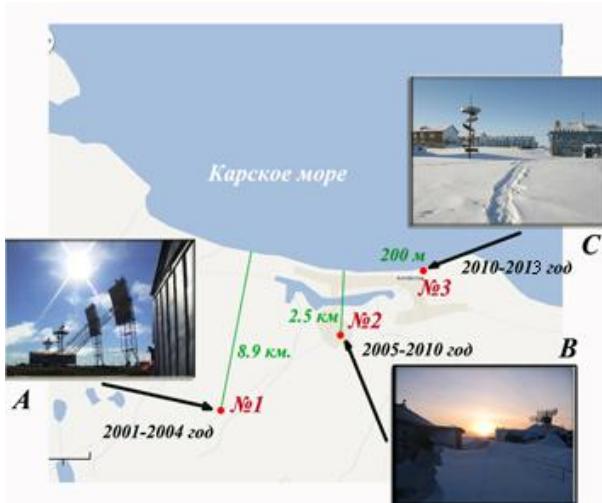
$S(P)_{ZERO_{\text{сред.}}}$  – среднее значение площади пика во время прокачки очищенного воздуха (площадь/пг);

$M_{Hg_{\text{сред.}}}$  – среднее значение массы ртути за период ручной калибровки (пг).

**В третьей главе** представлены результаты исследования динамики атмосферной ртути в Российской Арктике на базе полярной станции «Амдерма». На основе полученных данных долговременного мониторинга были проведены расчеты трендов многолетнего хода среднегодовых значений ЭГР для каждого периода с применением нормального и логнормального распределения в точках, где был установлен анализатор “Tekran 2537A” относительно береговой зоны Карского моря.

### *Перемещение анализатора к береговой черте Карского моря.*

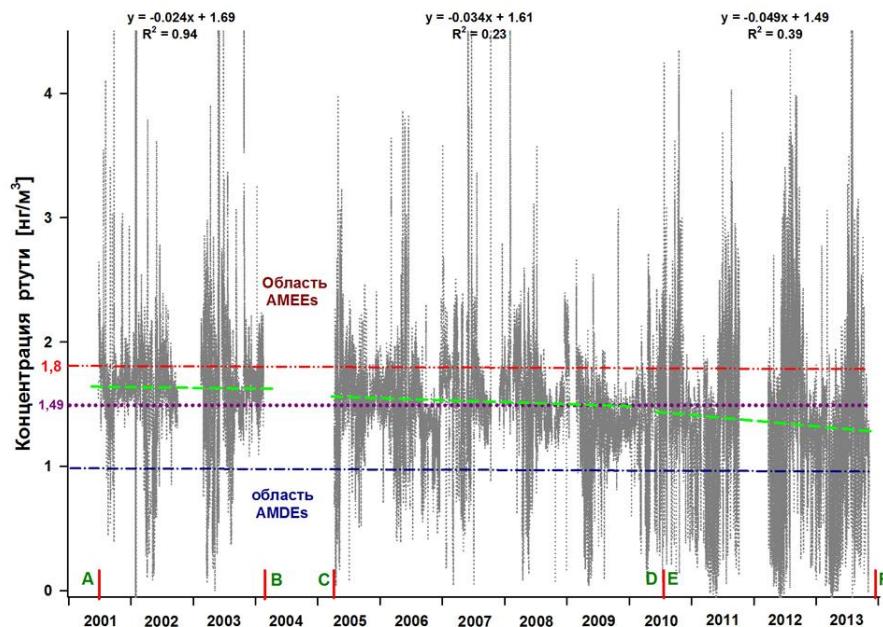
В течение 12-летнего периода наблюдений, начиная с 2001 г. анализатор “Tekran 2537A” находился в трех точках на разных расстояниях (от 8.9 до 0.2 км) от побережья Карского моря (см. рис 4). Необходимо отметить, что данный эксперимент в практике мониторинга тяжелых металлов в приземном слое атмосферы на российской полярной «Амдерма» станции был проведен впервые.



**Рис. 4.** Места установки анализатора за весь период наблюдения 2001–2013 г.г.

Поверхность тундры в районе проведения мониторинга представляет собой однородную холмистую низменность с одинаковыми природно-климатическими условиями (в каждой точке проведения измерений ЭГР фиксировались метеопараметры). Следовательно, можно считать, что наблюдения проводились в одинаковых условиях прибрежной зоны Карского моря (условия освещенности и облачность), и это не может в значительной степени повлиять на изменение в динамике ЭГР (максимальное расстояние между точками не превышало 6 км), особенно в холодное время года.

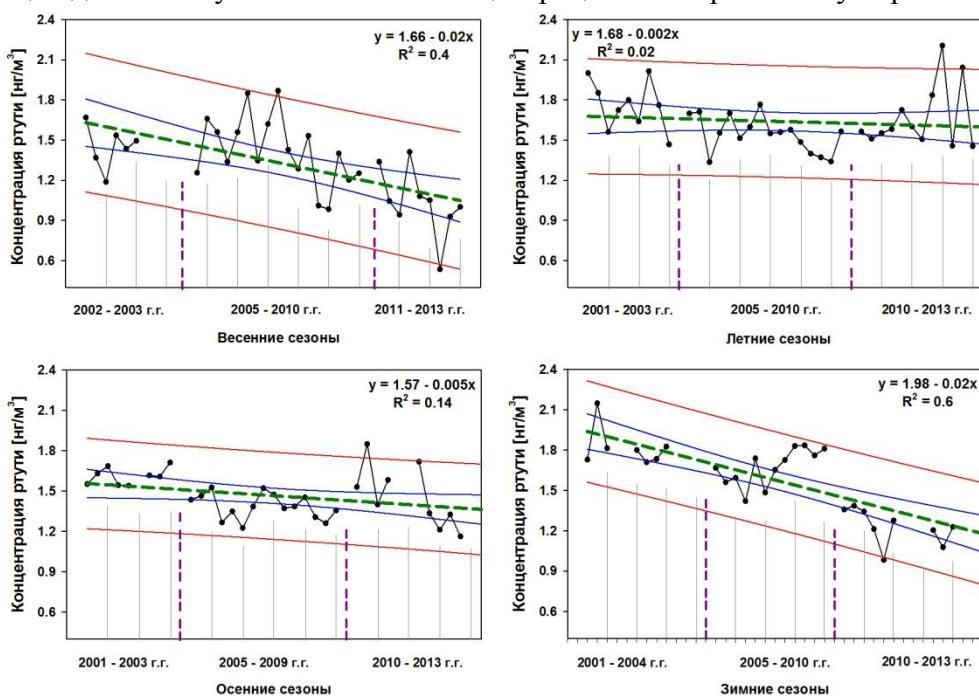
Для обозначения случаев, когда в течение длительного времени (не менее 2 часов) в приземном слое атмосферы регистрируются повышенные значения концентрации ртути ( $> 1,81 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) аналогично термину «истощения» используется термин «увеличения» ртути (AMEEs -Atmospheric Mercury Enhancement Events – события увеличения атмосферной ртути). Долговременный ряд значений концентрации ртути за весь период проведения исследования показан на рис.5. Анализ полученных данных в точке №1 показал, что в 2001–2004 г.г. среднее значение концентрации ртути составило  $1,65 \pm 1,91 \text{ нг}/\text{м}^3$ , (макс. –  $75,51 \text{ нг}/\text{м}^3$  и мин. –  $0,11 \text{ нг}/\text{м}^3$ , соответствующее пределу обнаружения) (рис.5, А-В).



**Рис. 5.** Долговременный ряд значений концентрации атмосферной ртути за период 2001–2004 г.г. (А,В), 2005–2010 г.г.(С,Д) и 2010–2013 г.г. (Е,Ф) для полярной станции «Амдерма»; для периода 2001–2013 г.г.: область «увеличения» ртути (красная штрихпунктирная линия с двумя точками – AMEEs); линейная аппроксимация среднегодовых значений (зеленая штриховая линия); область «истощения» ртути (штрихпунктирная линия – AMDEs);

Линейная аппроксимация тренда среднегодовых значений построена на основе выборки для периода времени (2001–2004 г.г.) с коэффициентом достоверности  $R^2 = 0,9$ . Аппроксимация данных логнормальным распределением показывает аналогичную тенденцию (линейная аппроксимация тренда среднегодовых значений с коэффициентом достоверности  $R^2 = 0,6$ ) (рис. 8). Для данного временного интервала рассчитано изменение среднего значения –  $\Delta C_{Hg} = +0,31 \text{ нг}/\text{м}^3$ , и отмечается высокая вариабельность значений ЭГР относительно всего периода мониторинга. Максимальная изменчивость концентрации ртути в приземном слое атмосферы зафиксирована в 2002 г. и расчетное значение стандартного отклонения ( $s$ ) составило  $\pm 1,91 \text{ нг}/\text{м}^3$ . 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. 5, А-В)) как для береговой зоны арктических морей, точки мониторинга №2 и №3 (рис. 5, С-Ф). В период мониторинга 2001–2004 г.г. количество случаев повышенных значений концентрации ( $> 1,81 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) оставалось неизменным в течение всех сезонов, следовательно, не отмечается тенденция к понижению концентрации ЭГР.

Для точки №2 (2005–2010 г.г.) было рассчитано среднее значение концентрации ртути -  $1,48 \pm 0,42 \text{ нг}/\text{м}^3$ , макс. -  $14,53 \text{ нг}/\text{м}^3$  и был зафиксирован понижающий тренд (рис. 5, С-Д). Однако, для данного временного отрезка впервые во время полярной ночи 2006–2007 г.г. отмечаются продолжительные случаи истощения ртути при полном отсутствии суммарной 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.

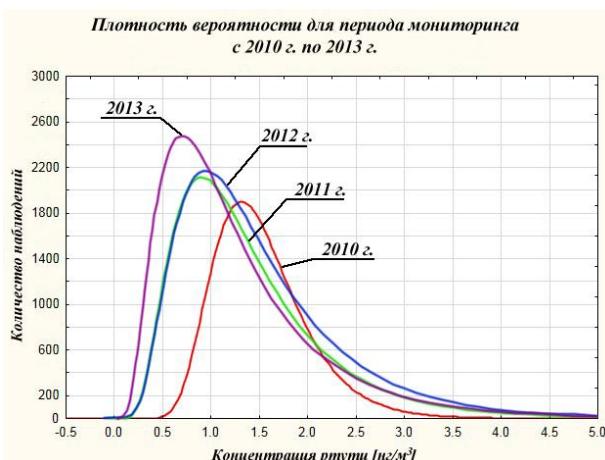


**Рис. 6.** Сезонная изменчивость концентрации ЭГР в период долговременного мониторинга (2001–2013 г.г.); линейная аппроксимация тренда среднемесячных значений ЭГР (зеленая штриховая линия) для всех сезонов.

В июне 2010 г. анализатор был установлен в точке №3 (около 200 м от береговой линии Карского моря). Анализ данных показал, что с июня 2010 г. по октябрь 2013 г. среднее значение концентрации ЭГР составило  $1,38 \pm 0,84 \text{ нг}/\text{м}^3$ , макс. -  $94,35 \text{ нг}/\text{м}^3$ , и зафиксирован понижающий тренд (рис. 5, Е-Ф). Следует отметить, что наименьшее из средних значений

(1,23 нг/м<sup>3</sup>) рассчитано для 2013 г. Сравнительный анализ динамики ЭГР для 4 летнего периода мониторинга (2010-2013 г.г.) показал, что наблюдается понижение концентрации ЭГР, начиная с 2005 г., особенно это заметно для весенних и зимних сезонов (рис.6).

Количественная оценка среднемесячных значений концентрации ЭГР для различных сезонов (рис. 6) показала, что наиболее интенсивные процессы вывода ЭГР из приземного слоя атмосферы наблюдаются в весенние ( $\Delta C_{Hg} = -0,59$  нг/м<sup>3</sup>) и зимние сезоны ( $\Delta C_{Hg} = -0,75$  нг/м<sup>3</sup>). Следует учесть, что в зимний период времени происходит поступление СЗВ в Арктику, следовательно, концентрация ЭГР в приземном слое атмосферы должна возрастать. Значения плотности вероятности логнормального распределения для выборки за период с июня 2010 г. по октябрь 2013 г. показали, что наблюдается значительная асимметрия относительно среднего арифметического значения влевостороннюю область, где чаще встречаются более низкие значения признака (значения концентрации ЭГР).



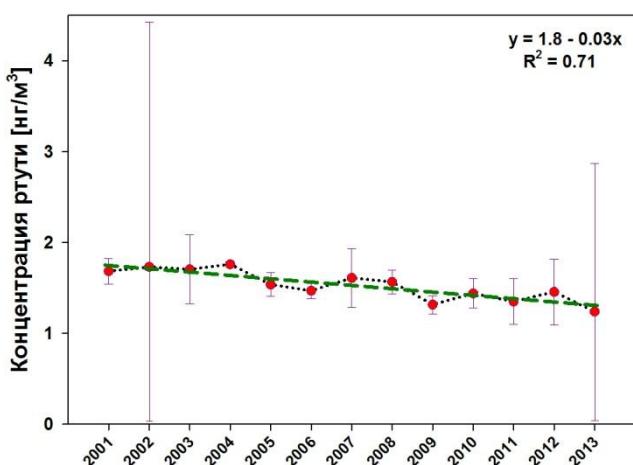
**Рис. 7.** Плотность вероятности логнормального распределения для концентрации ЭГР в период мониторинга с июня 2010 г. по октябрь 2013 г.

Особенно явно проявляется асимметрия для графика функции плотности логнормального распределения за 2013 г. Смещение в область пониженных значений концентрации ЭГР основано на увеличении количества событий истощения ртути, фиксируемых в зимние сезоны 2010–2013 г.г. Для оценки динамики

ЭГР в приземном слое атмосферы для всего периода проведения мониторинга (июнь 2001 г. по октябрь 2013 г.) был проведен расчет и построена линейная аппроксимация тренда среднегодовых значений концентрации ЭГР для логнормального распределения с коэффициентом достоверности  $R^2 = 0,7$  (рис. 8). Для данного временного интервала было рассчитано изменение среднего значения –  $\Delta C_{Hg} = -0,43$  нг/м<sup>3</sup>.

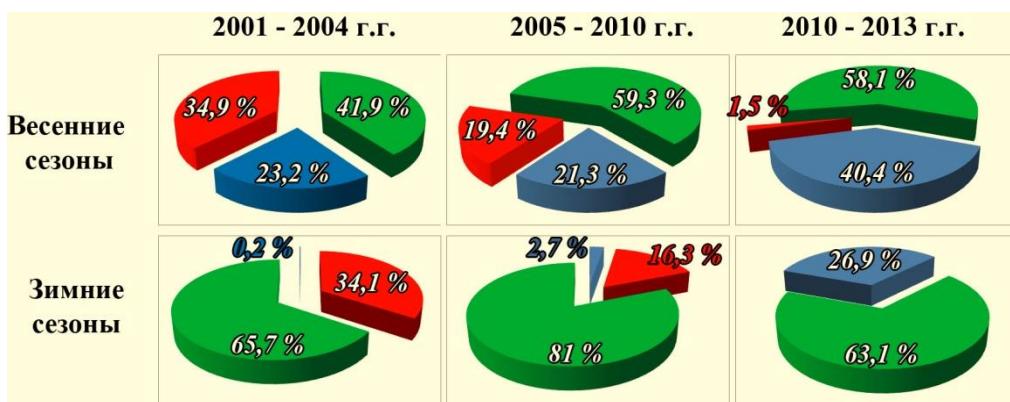
**Рис. 8.** Межгодовая изменчивость среднегодовых значений концентрации ЭГР плотности вероятности логнормального распределения в период мониторинга с 2001 по 2013 г.; линейная аппроксимация тренда (зеленая штриховая линия).

Исходя из полученных данных по результатам проведенного исследования, и на основе применения различных статистических методов можно сделать вывод, что зафиксирована тенденция к уменьшению ЭГР в приземном слое атмосферы. В последнее время происходит рост значений температуры и относительной влажности в приземном слое атмосферы Арктики, а так же отмечается отсутствие ледового покрова в прибрежной полосе Карского моря в зимние месяцы. Именно этот фактор может приводить к интенсивному осаждению различных форм ртути на подстилающую поверхность, так как скорость сухого осаждения над водной поверхностью всегда выше, чем над сушей. Диффузионные и турбулентные



процессы в приземном слое атмосферы способствуют интенсивному стоку ртути из приземного слоя атмосферы, особенно в зимние сезоны. Данное предположение подтверждает расчет относительных вкладов повышенных, средних и пониженных значений ЭГР, приведенных на рис. 9.

В весенние сезоны, для пониженных значений концентраций было зафиксировано двух кратное увеличение, с 21,3% до 40,4%. Отмечается интенсивный рост пониженных значений концентраций ЭГР в зимние сезоны. Для периода мониторинга с июня 2010 г. по октябрь 2013 г., рост этих значений составил 26,9%, что в 10 раз больше по сравнению с аналогичными зимними сезонами в 2005–2010 г.г., и почти в 100 раз превышает аналогичный показатель для зимы 2001–2004 г.г. (рис.9).



**Рис. 9.** Соотношение вкладов значений концентрации ЭГР в приземном слое атмосферы; повышенные значения:  $> 1,81 \text{ нг}/\text{м}^3$  (красный сектор), средние значения:  $1,01 - 1,81 \text{ нг}/\text{м}^3$  (зеленый сектор), пониженные значения концентрации:  $< 1,01 \text{ нг}/\text{м}^3$  (синий сектор).

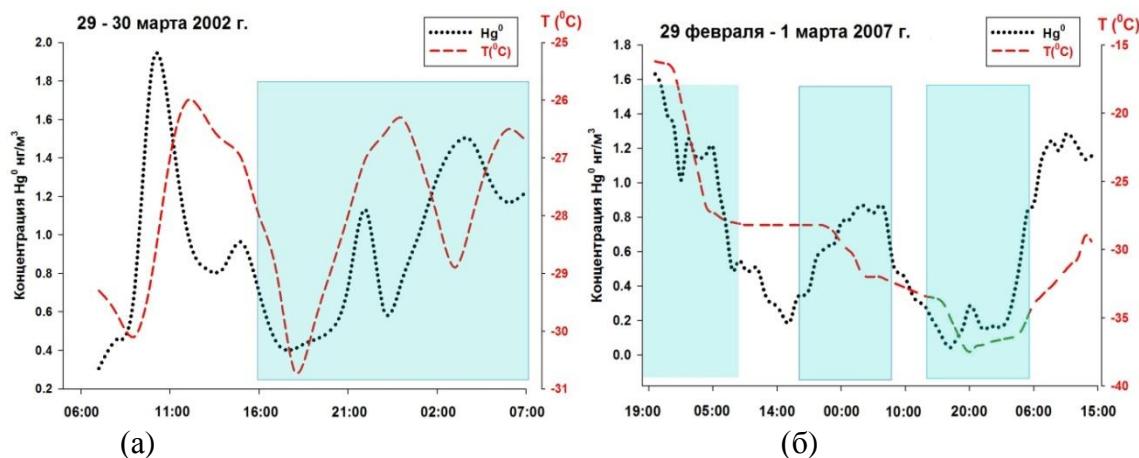
Данный факт указывает на то, что возле береговой черты Карского моря резко возрастает интенсивность процессов истощения атмосферной ртути особенно в зимние сезоны но при этом не фиксируются повышенные значения концентрации ЭГР. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что для двух периодов мониторинга (с 2005 по 2009 г. и с 2009 по 2013 г.) наблюдается устойчивая тенденция к понижению концентрации ЭГР (рис. 6), особенно в весенние и зимние сезоны.

#### *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  $0,11 \text{ нг}/\text{м}^3$ ), а затем концентрация возвращается к усредненным для данного региона значениям ( $1,51 - 1,71 \text{ нг}/\text{м}^3$ ), то такой эпизод принято считать «краткосрочным» случаем истощения ртути (рис. 10,а). Если процесс истощения ртути протекает от нескольких часов до нескольких суток, и значения концентрации в этот период времени остаются ниже порогового уровня ( $< 1,01 \text{ нг}/\text{м}^3$ ), то такой случай принято считать «длительным» (рис.10,б). В данном примере рассматривается «краткосрочный» и «длительный» случаи истощения ртути, а также суточный ход температуры в приземном слое атмосферы для двух эпизодов: март 2002 г. и февраль - март 2007 г. Следует отметить, что длительность светового периода не оказывает влияния на эффект истощение 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. 10,а), и при достижении минимального значения был зафиксирован эффект истощения с минимальным значением концентрации (0,39 нг/м<sup>3</sup>). Пониженное значение концентрации ЭГР было получено в период, когда отсутствовало солнечное излучение (темный прямоугольник на рис. 10,а).

Один из «длительных» эпизодов истощения ртути был зарегистрирован с 29 февраля по 1 марта 2007 г. (рис. 10,б). Температура в этот период понижалась с -16 до -37°C и значение концентрации ртути на момент достижения минимальной температуры составило 0,12 нг/м<sup>3</sup>. Анализ корреляционной зависимости показал наличие связи величины T<sup>0</sup>C с концентрацией ЭГР ( $R^2 = 0,52$ ) для периода с 29 по 31 марта 2002 г. и ( $R^2 = 0,67$ ) для периода с 29 февраля по 1 марта 2007 г.



**Рис. 10.** «Краткосрочный» и «длительный» 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.

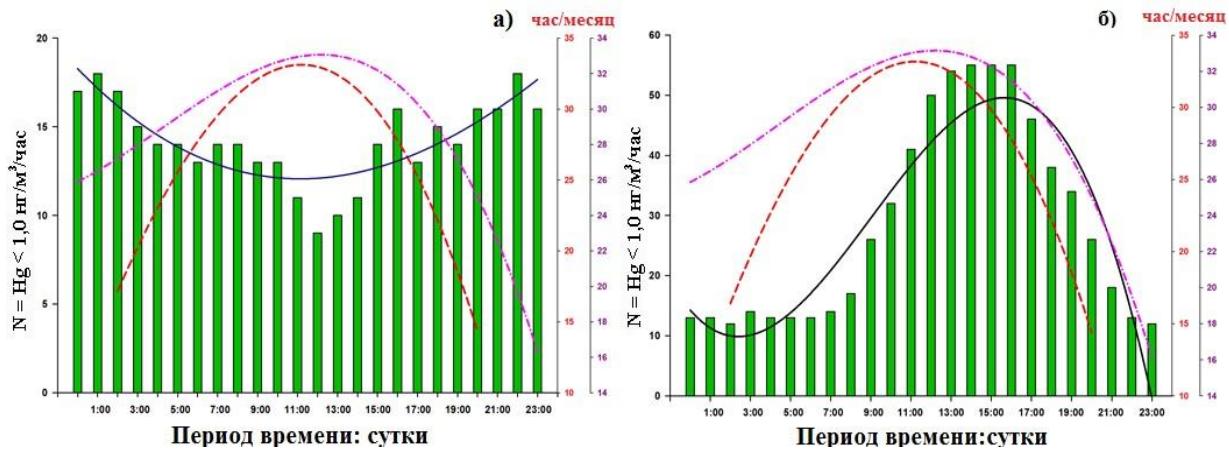
В основном, случаи истощения не регистрируются, если скорость ветра превышает 10 м/с, хотя в некоторых случаях уменьшение концентрации ртути наблюдалось и при более высоких скоростях ветра. Следует отметить, что процесс низкотемпературной сублимации водяного пара с осаждением ртути на образующиеся в приземном слое атмосферы кристаллы льда играет основную роль во время истощения. Данный эффект (особенно в зимние сезоны) вносит существенный вклад в процесс вывода 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 при юго-западном и юго-восточном атмосферном переносе может приводить к захвату ЭГР аэрозольными частицами и как следствие к возникновению событий истощения ртути.

**В четвертой главе** приведен анализ данных для случаев истощения ртути в различные сезоны и для периодов времени, когда анализатор находился в различных точках проведения мониторинга. Представлены результаты расчета интенсивности солнечной активности и процессов истощения ртути в этот период времени.

#### *Суточная динамика атмосферной ртути в период полярной весны.*

В качестве примера рассмотрен суточных ход пониженных значений концентрации (< 1,01 нг/м<sup>3</sup>) рассчитанный для весны (март – май) 2005 и 2011 г.г. (рис.11 а,б). Для весны

2005 г. (рис. 11,а) показано, что увеличение суммарной солнечной радиации не влияет на рост количества зарегистрированных пониженных значений концентрации ЭГР. С возрастанием солнечной радиации в течение суток наблюдается обратный эффект, т.е. с 9:00 до 15:00 часов отмечается уменьшение количества пониженных значений концентрации (4 случая истощения ртути).



**Рис. 11.** Суточная динамика ртути ( $< 1,01 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) сплошная линия - полиномиальная линия тренда, продолжительность светового дня: 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.

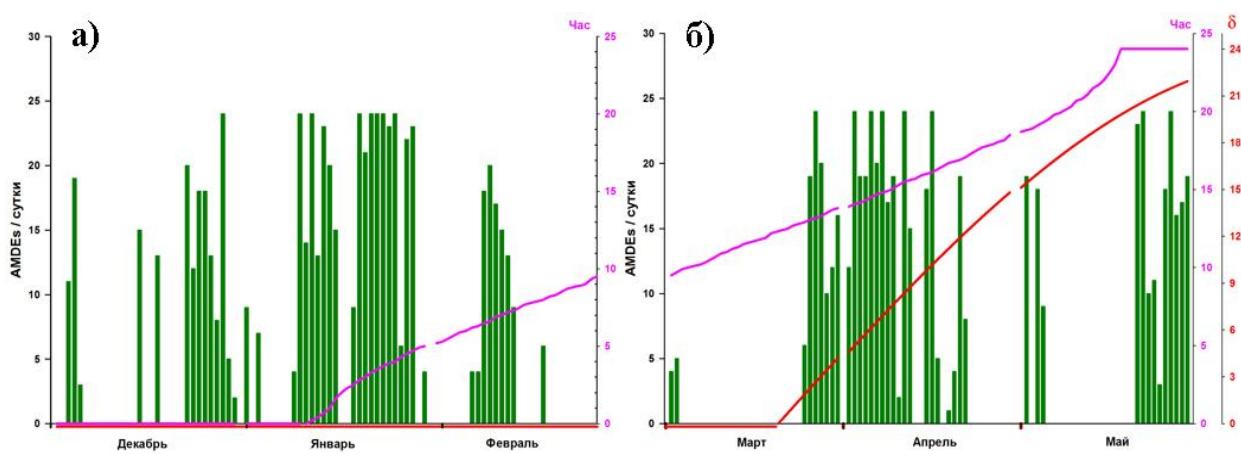
В то же время для вечернего периода (особенно с 17:00 до 00 часов) отмечается наибольшее количество пониженных значений и 12 случаев истощения ртути. Подобная динамика ртути зависит от наличия ледового покрова в прибрежной зоне Карского моря. Например, в случае для 2005 г., в момент, когда наблюдалась максимальная суммарная солнечная радиация, не отмечались процессы истощения ртути, что может быть связано с отсутствием в приземном слое атмосферы достаточного количества морского аэрозоля (рис. 11,а), хотя процессы фотохимических реакций не прекращались. Для весны 2011 г. зафиксировано увеличение случаев истощения ртути (до 62 событий) во время наибольшей интенсивности солнечной радиации (рис. 11,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 реакционных галогенов  $\text{Br}^-$  и  $\text{Cl}^-$ , однако как показано для случая 2005 г. это не являлось основной причиной активизации процесса истощения ЭГР.

В летние сезоны регистрируются повышенные концентрации ртути вследствие активного испарения различных её форм при интенсивном прогреве поверхности тундры. В период летнего солнцестояния происходит интенсивное перемешивание приземных слоев атмосферы, что приводит к практическому отсутствию случаев истощения элементарной газообразной ртути, но в некоторые сезоны отмечались несколько единичных случаев. Диапазон значений концентрации ртути в летние сезоны составляет от 1,32 до 2,23  $\text{нг}/\text{м}^3$ . Изменение среднего значения для различных периодов мониторинга: с 2001 по 2004 г. –  $\Delta C_{\text{Hg}} = -0,03 \text{ нг}/\text{м}^3$ ; с 2005 по 2010 г. –  $\Delta C_{\text{Hg}} = -0,02 \text{ нг}/\text{м}^3$ ; с 2010 по 2013 г. –  $\Delta C_{\text{Hg}} = +0,03 \text{ нг}/\text{м}^3$ . Результаты исследования свидетельствуют о незначительном повышении значений концентрации ЭГР за последние три года, и в целом, в летние сезоны отмечаются более высокие значения, чем в остальные сезоны в период проведения мониторинга (рис.6).

### **Суточная динамика в зимний период.**

В зимний сезон (декабрь-январь) 2010–2011 г.г. (рис. 12,а) было зарегистрировано максимальное количество пониженных значений ртути (495) и случаев истощения ртути (32 случая), которые до этого времени наблюдались только в зимний сезон 2006–2007 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 и максимальное количество зафиксировано в январе 2011 г. (18 случаев, наибольшая продолжительность – 46 час). В весенний сезон, начиная со второй половины марта (рис. 12,б), увеличивается угол склонения солнца над горизонтом и поступающей суммарной солнечной радиации достаточно для активизации фотохимических реакций но в течение двух месяцев (март – май) не зафиксировано линейной зависимости между склонением солнца над горизонтом (красная сплошная линия) и количеством случаев истощения ртути (рис. 12,б).



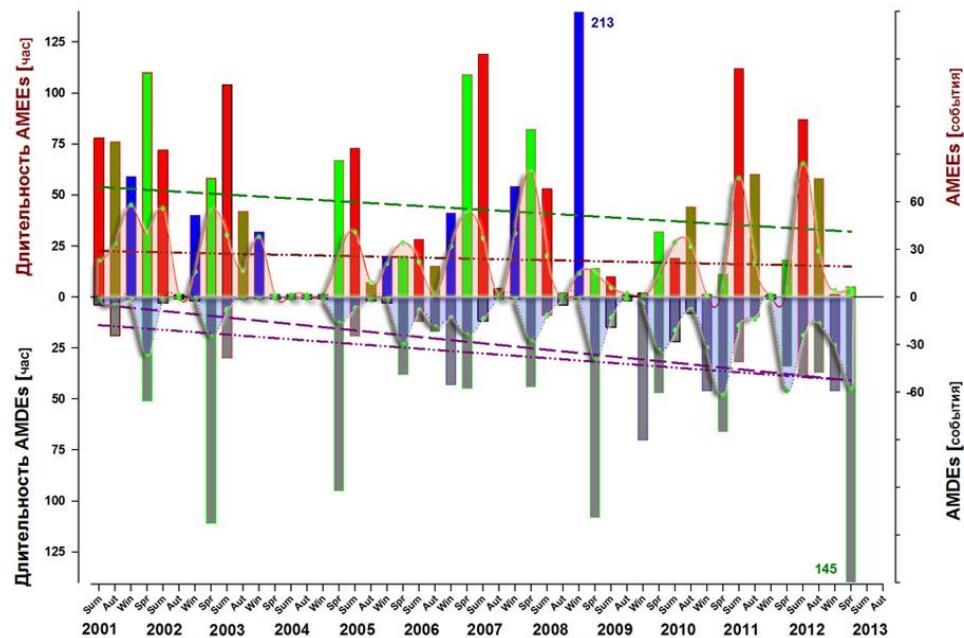
**Рис. 12.** Количество пониженных значений ртути в течение суток (столбчатая диаграмма), долгота дня (час, фиолетовая линия), и склонение солнца ( $\delta$  - красная линия) над горизонтом: (а) декабрь-январь 2010-2011 г.г. и (б) март-май 2011 г.

Максимальное количество пониженных значений (300) и случаев истощения ртути (21 случай) с максимальной продолжительностью (до 66 часов) отмечается в апреле месяце, хотя в это время наблюдается не самая высокая интенсивность суммарной солнечной радиации. Подобные случаи истощения связаны с наличием больших концентраций морского аэрозоля, так как отсутствует ледовый покров в прибрежной зоне Карского моря. Не следует исключать и возможность участия антропогенных аэрозольных составляющих в процессе стока ртути из приземного слоя атмосферы.

### **Сезонная динамика случаев истощения и увеличения ртути.**

На основе данных долговременного мониторинга ЭГР можно получить представление о сложных физико-химических процессах, протекающих в приземном слое атмосферы.

В период с 2001 по 2004 г. (рис. 13) для событий увеличения атмосферной ртути (AMEEs - Atmospheric Mercury Enhancement Events) были зарегистрированы близкие значения (2001 г. – 58, 2002 г. – 56 и 2003 г. – 54 случая соответственно), что говорит об отсутствии для данного периода 2001 характерной тенденции к уменьшению концентрации в приземном слое атмосферы. Максимальная длительность периодов увеличения ртути зарегистрирована для весны 2002 г. – 110 часов. Для длительности этих случаев в зимние сезоны (2002–2003 г.г.) зафиксирована положительная 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. 13.** 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. наблюдается тенденция к росту (18 случаев/год) событий увеличения ртути. 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. Максимальное значение для этого периода более чем в 4 раза превышает по длительности значение полученное для периода 2001–2004 г.г. Максимальное количество случаев истощения зарегистрировано весной 2006 г. (30 случаев), а зимой 2008–2009 г.г. отмечается максимальная длительность (70 ч.).

С 2010 по 2013 г. (точка №3 – 200 м от побережья Карского моря) отмечается увеличение событий истощения ртути в зимний сезон (декабрь – февраль 2012–2013 г.г.), а также рассчитано максимальное значение для этих событий (31 случай) относительно предыдущих лет. Обращает на себя внимание резкое увеличение (до 145 час.) длительности

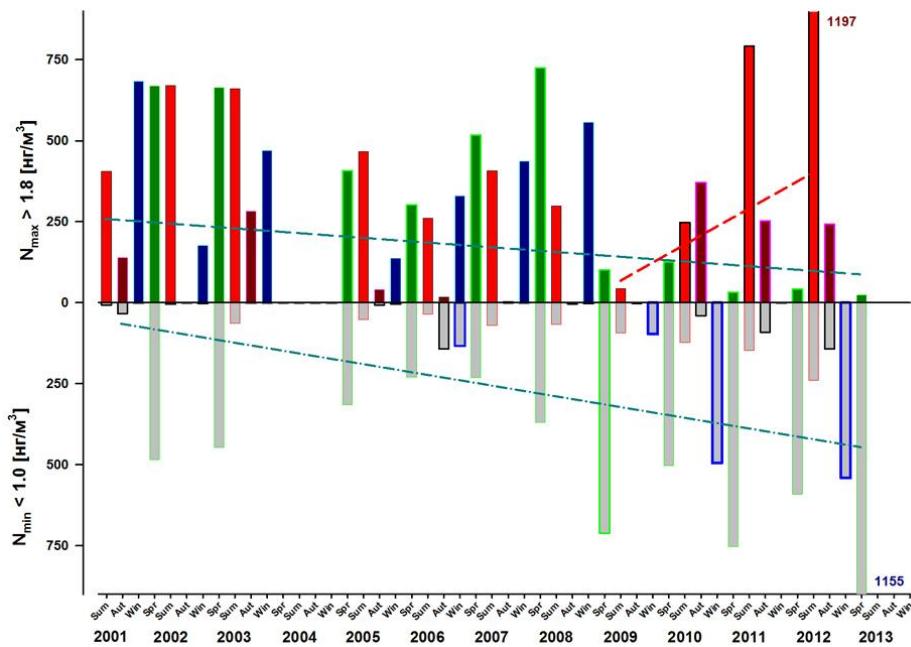
событий истощения атмосферной ртути в весенний сезон 2013 г. Это в 5 раз больше чем зафиксировано за аналогичный период 2006 г. (31 час.), и в 10 раз больше чем было зарегистрировано в зимний сезон для периода мониторинга в точке №1 (2001–2004 г.г.).

### **Сезонная динамика количества случаев повышенных и пониженных значений концентрации ртути.**

В результате статистической обработки данных (с июня 2001 г. по май 2013 г.) для двух диапазонов значений концентрации ртути ( $\geq 1,81 \text{ нг}/\text{м}^3$  – повышенные и  $< 1,01 \text{ нг}/\text{м}^3$  – пониженные концентрации) было выделено три основных временных периода.

Для первого периода (точка №1, около 9 км от побережья Карского моря) с июня 2001 г. по март 2004 г. наблюдается тенденция, когда количество повышенных значений концентрации ртути остаётся практически на одном уровне (см. рис. 14) особенно в весенне-летние сезоны 2002–2003 г.г., что характерно для динамики ртути в средних широтах.

Второй и наиболее длительный период мониторинга (точка №2 - 2,5 км от побережья Карского моря (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. Для пониженных значений концентрации в 2009 г. зарегистрировано максимальное (711) число таких случаев.



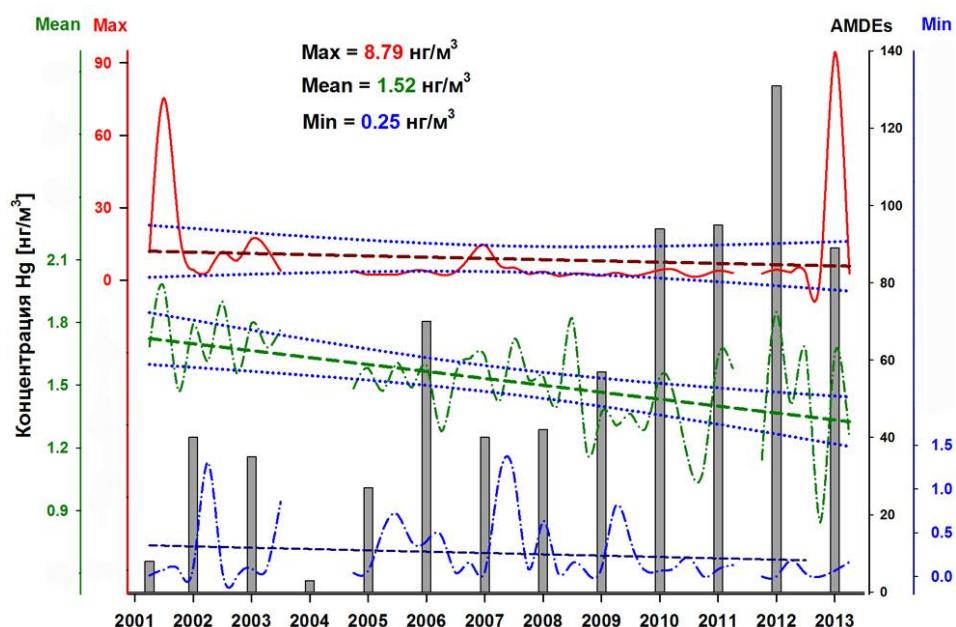
**Рис. 14.** Сезонная динамика повышенных ( $N_{\max} - \geq 1,81 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) и пониженных ( $N_{\min} - < 1,01 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) значений концентрации ртути в период проведения мониторинга (столбчатая диаграмма); количество значений  $N_{\max}$  и  $N_{\min}$  (столбчатая диаграмма; 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).

Третий период (с июня 2010 г. по июль 2013 г.), когда анализатор был установлен на расстоянии около 200 м от побережья Карского моря, характерен наличием повышающего тренда, связанного с регистрацией большого количества (475 случаев/год) повышенных значений концентрации ртути в летние сезоны (2010–2012 г.г.). В 2012 г. было зарегистрировано максимальное (1197) для всего периода мониторинга количество подобных значений (рис. 14). Столь интенсивный рост связан с тем, что над местом проведения измерений прошло вулканическое облако активно действующих в это период времени вулканов Eujafallajökull и Grímsvötn (Исландия).

Весной 2013 г. для минимальных значений концентрации ртути зарегистрировано максимальное количество эпизодов (1155), что является абсолютным максимумом для всего периода мониторинга. На основе данных (для периода 2010–2013 г.г.) подтверждается тенденция к смещению процессов истощения ртути в область зимних сезонов. Это приводит к возникновению дополнительного фактора осаждения ртути в различные экосистемы Арктики, и отмечается тенденция к увеличению количества событий истощения ртути (в 8 раз возросла интенсивность по сравнению с предыдущими годами). В то же время, для случаев увеличения ртути зарегистрировано смещение с весенних в летние сезоны. Необходимо также отметить тенденцию к увеличению (более чем в 2 раза) случаев истощения ртути в летние и осенние сезоны (2010–2013 г.г.) относительно предыдущих лет. Подобная динамика ртути может вызвать дополнительное как минимум двукратное увеличение поступления ртути в различные экосистемы российской Арктики.

#### **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 с изменениями климатических условий в Арктике и с антропогенной деятельностью.



**Рис.15.** Среднегодовые максимальные, средние и минимальные значения концентрации ртути в период наблюдений с 2001 по 2013 г. в районе п. Амдерма; количество AMDEs - столбчатая диаграмма.

На (рис. 15) 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/м<sup>3</sup>; с апреля 2005 г. по июнь 2010 г. –  $1,48 \pm 0,39$  нг/м<sup>3</sup> и с июня 2010 г. по октябрь 2013 г. –  $1,38 \pm 0,84$  нг/м<sup>3</sup>. Наблюдаемые концентрации элементарной ртути в приземном слое атмосферы соответствуют глобальным фоновым уровням для арктических регионов ( $1,51\text{--}1,71$  нг/м<sup>3</sup>) но наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению концентрации ЭГР. Аналогичная тенденция наблюдается на полярной станции «Алерт» (Канада) – уменьшение концентрации ртути, 1994 – 2008 г.:  $1,57 - 1,45$  нг/м<sup>3</sup> и на полярной станции «Нью Олесуннд» (Норвегия), 2000 – 2008 г.:  $1,61 - 1,52$  нг/м<sup>3</sup>.

Максимальное значение зарегистрировано для зимнего сезона 2001 г. (75,51 нг/м<sup>3</sup>). В летние периоды времени в 2003 г. и 2007 г. зарегистрированы повышенные значения концентрации ртути 17,13 нг/м<sup>3</sup> и 14,52 нг/м<sup>3</sup> соответственно. Особо следует отметить зарегистрированное летом 2013 г. повышенное значение концентрации ртути 94,51 нг/м<sup>3</sup> – наибольшее относительно всего долговременного периода наблюдений. Динамика средних значений концентрации ртути, рассчитанная для всего периода проведения мониторинга (с июня 2001 г. по май 2013 г.), показывает устойчивый отрицательный тренд (-0,41 нг/м<sup>3</sup>/период). Динамика минимальных значений показывает незначительный отрицательный тренд (-0,17 нг/м<sup>3</sup>/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 наблюдается положительная тенденция (11 AMDEs/год), что косвенно указывает на то, что подобные процессы обусловлены изменениями в приземном слое атмосферы российской Арктики вызванные климатическими факторами.

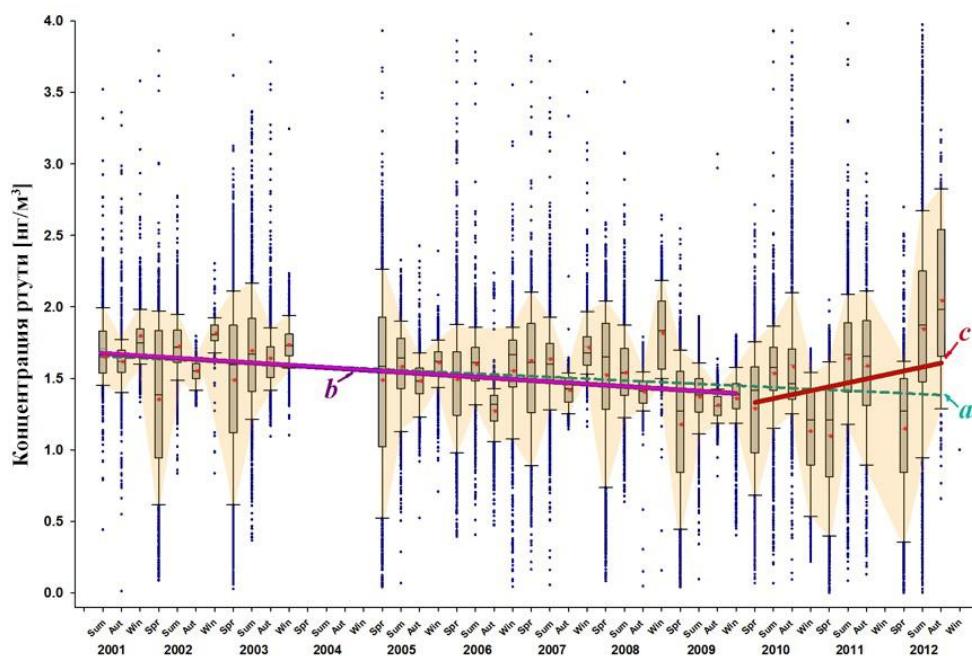
Анализ долговременного ряда значений температуры воздуха в приземном слое атмосферы за весь период наблюдений показал, что положительный тренд характерен как для средних значений температуры (+0,22 °С/год), так и для минимальных значений (+0,04 °С/год). В 5,5 раз быстрее происходит увеличение средних значений температуры относительно минимальных значений. Это свидетельствует о повышении температуры в приземном слое атмосферы российской Арктики. Однако для максимальных значений температуры наблюдается отрицательный тренд (-0,18 °С/год). Наблюдается положительный тренд для средних значений относительной влажности (+0,51 %/год) и еще более интенсивное увеличение для минимальных значений. Таким образом, на протяжении всего периода наблюдений количество влаги в воздухе арктических районов увеличивается, что характерно для периодов потепления.

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, что в последние годы резко возросло поступление ртути в растительность и различные биологические объекты в высоких широтах Арктики.

**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.

### Эпизоды вулканической деятельности.

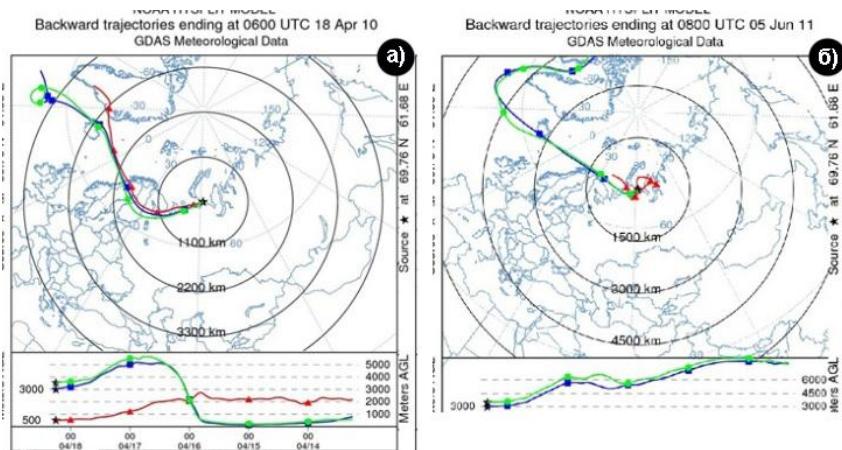


**Рис. 16.** Сезонная динамика долговременного мониторинга (2001–2012 г.г.) концентрации атмосферной ртути в приземном слое атмосферы на полярной станции; линейные тренды для периодов: (а) 2001–2012 г.г., (б) 2001–2009 г.г., и (с) 2010–2012 г.г.

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. 16,а). При этом среднее значение концентрации за весь период наблюдения составляет  $1,49 \pm 0,45$  нг/м<sup>3</sup> и отмечается увеличение концентрации и рост значений вариабельности. В то же время для периода с 2001 по 2009 г. наблюдалась устойчивая тенденция к уменьшению концентрации ртути (рис. 16,б).

Следует отметить, что наибольшее среднее значение концентрации ртути составило  $1,67 \pm 0,31$  нг/м<sup>3</sup> (2001 г.) и наименьшее  $1,32 \pm 0,33$  нг/м<sup>3</sup> (2009 г.). Для периода времени (2001–2009 г.г.) наблюдался отрицательный тренд концентрации ртути ( $-0,12$  нг/м<sup>3</sup>/год) (рис. 16,б), однако, для периода (2010–2012 г.г.) наблюдается значительная положительная динамика поведения ртути в приземном слое атмосферы и высокая вариабельность (рис. 16,с). В период с 13 апреля по 12 мая 2010 г. были зафиксированы повышенные концентрации –  $C_{Hg} = 1,81 - 2,75$  нг/м<sup>3</sup>. В 2011 г., с мая по июнь месяц также были зарегистрированы высокие значения –  $C_{Hg} = 1,97 - 3,69$  нг/м<sup>3</sup>. В 2010 г. среднее значение концентрации составило  $1,43 \pm 0,41$  нг/м<sup>3</sup>, а в 2012 г. –  $1,55 \pm 0,71$  нг/м<sup>3</sup> соответственно. Впервые за последние годы для периода времени (с 2010 по 2012 г.) зарегистрирован положительный тренд ( $+0,22$  нг/м<sup>3</sup>/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).



**Рис. 17.** Обратные траектории атмосферного переноса (модель NOAA HYSPLIT) приходящие в точку мониторинга ртути (а) 18 апреля 2010г. (Eyjafjallajökull), (б) 5 июня 2011 г. (Grímsvötn), связанные с активной фазой извержения вулканов в Исландии.

В период извержения вулкана Eyjafjallajökull с марта по май 2010 г. наблюдалось постепенное повышение средних значений концентрации ртути ( $+0,11 \text{ нг}/\text{м}^3/\text{мес.}$ ) (рис. 16,с), что в четыре раза выше при сравнении с тем же периодом для 2009 г. ( $-0,32 \text{ нг}/\text{м}^3/\text{мес.}$ ). Для нескольких суток, когда регистрировались повышенные концентрации, были построены обратные траектории, что дает возможность определить происхождение воздушных потоков приходящих к месту измерения атмосферной ртути (рис. 17 а,б).

Рассчитанные обратные траектории показывают, что источником поступления ртути в полярную область российской Арктики и вследствие этого регистрация высоких значений концентрации ЭГР могут являться действующие вулканы в Исландии. Следовательно, осажденная 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 отсутствуют потенциальные источники ртути (рис. 17). 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».

Оценочное исследование АМАР показало, что уровень ртути в биообъектах арктического региона постоянно возрастает. Особый интерес представляют данные по тяжелым металлам, повышенные концентрации которых регистрируются как в биоте, так и в крови местного населения. В связи с этим АМАР прилагает большие усилия для реализации программы по долговременному мониторингу ртути в Арктике. Как показали проведенные исследования, данные о концентрации атмосферной ртути, полученные на полярной станции «Амдерма», имеют большое значение и используются для прогноза и модельных расчетов поступления и распределения ртути в различных экосистемах Северного полушария (AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic, Oslo, 2011, chapter 2, pp. 24-25).

На основе данных проведенного долговременного мониторинга будет проведена оценка интенсивность осаждения ртути на подстилающую поверхность в различные периоды времени, а также рассчитано количественное поступление ртути во всех её формах в

арктические экосистемы. Данные о повышенных значениях концентрации ЭГР будут использованы при определении вероятных источников загрязнения находящихся как за полярным кругом, так и в других регионах Северного полушария. Анализ динамики атмосферной ртути в совокупности с метеоданными позволил получить и систематизировать исходные данные, которые можно в дальнейшем использовать для оценки поступления различных форм ртути по пищевым цепочкам в биообъекты Арктических экосистем, начиная с момента попадания ртути в водные и сухопутные среды и до концентрации в организме хищных животных.

Проведение дальнейших исследований на полярной станции «Амдерма» даст возможность оперативно получать данные в реальном режиме времени о концентрации ртути в приземном слое атмосферы. Полярная станция «Амдерма» является на данный момент единственной точкой мониторинга атмосферной ртути в российской Арктике и одной из трех международных станций долговременного мониторинга в Северном полушарии.

## ВЫВОДЫ

- 1.** По данным многолетнего мониторинга (2001–2013 г.г.) в российской Арктике зафиксирована устойчивая тенденция к снижению концентрации ртути в приземном слое атмосферы с  $C_{\text{Hg}} = 1,65 \pm 1,91 \text{ нг}/\text{м}^3$  до  $C_{\text{Hg}} = 1,38 \pm 0,84 \text{ нг}/\text{м}^3$ . Подобная тенденция характерна и для двух других международных полярных станций в Арктике «Алерт» (Канада) и «Нью Олесуннд» (Норвегия).
- 2.** Установлено, что процессы истощения ртути активно протекают в ограниченной области вдоль береговой линии арктических морей. Наиболее интенсивные процессы вывода ртути из приземного слоя атмосферы наблюдаются близи береговой черты Карского моря (порядка 200 м, для периода мониторинга 2010–2013 г.г.). Зафиксировано двукратное увеличение количества случаев с пониженными значениями концентрации для весенних сезонов с 23,2% до 40,4%, а для зимних сезонов отмечено 10 кратное увеличение случаев истощения – с 0,2% до 26,9%.
- 3.** В период летнего солнцестояния происходит интенсивное перемешивание приземных слоев атмосферы, что приводит к практическому отсутствию случаев истощения элементарной газообразной ртути. Диапазон значений концентрации ртути в этот период составляет от 1,32 до 2,23  $\text{нг}/\text{м}^3$ .
- 4.** Применение метода траекторного моделирования с расчетом обратных траекторий (модель NOAA HYSPLIT) впервые позволило, для полярной станции «Амдерма» зафиксировать влияние дальнего атмосферного переноса в условиях интенсивной вулканической деятельности в Исландии (2010–2011 г.г.). Значение концентрации атмосферной ртути за этот период времени возрастало примерно в 1,2–2 раза (2010 г. –  $C_{\text{Hg}} = 1,81–2,75 \text{ нг}/\text{м}^3$ , в 2011 г. –  $C_{\text{Hg}} = 1,97 – 3,69 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) по сравнению со средними значениями за предыдущие периоды мониторинга.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

Статьи в изданиях перечня ВАК РФ по теме диссертации:

1. Коноплёт 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.

Другие публикации:

3. 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. – т. 2., с. 120-121.
4. **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.
5. 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.
6. **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.
7. **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.
8. **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

9. **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\\_Evironment\\_and\\_Climatic\\_Change\\_Assessment\\_and\\_Modeling/Short\\_reports/4-Pankratov.pdf](http://www.scert.ru/enviromis/2008/presentation/Presentation/Conference/Session_7_Evironment_and_Climatic_Change_Assessment_and_Modeling/Short_reports/4-Pankratov.pdf)
10. Коноплев А.В., **Панкратов Ф.Ф.** Исследование эффекта уменьшения атмосферной ртути в атмосфере российской Арктики // Научная конференция «Вклад России в МПГ», 2-8 октября 2008 г.: Тез. док. – г. Сочи, 2008., с. 98.
11. **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)).

**12. 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. док. и постер. – г. Томск, 2011. – <http://www.scert.ru/conferences/cites/2011/presentation/ConferenceEng.html>

**13.** 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 10<sup>th</sup> International Conference on Mercury as a Global Pollutant, July 24-29, 2011. Halifax, Nova Scotia, Canada: RS1-P2, P. 168.

**14. 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](http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/poster_programme/9022/XY130/EGU2012-10377)

**15. Pankratov F.**, Mahura A., Popov V., Katz O. Long-term continuous monitoring of mercury in the Russian arctic: winter increase of atmospheric mercury depletion events. // Synopsis and Poster, Atmospheric Sciences, Pan Eurasian Experiment (PEEX). European Geosciences Union, General Assembly 2014. April 27 – 02 May, 2014, Vienna, Austria: Abstract. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/posters/15039>