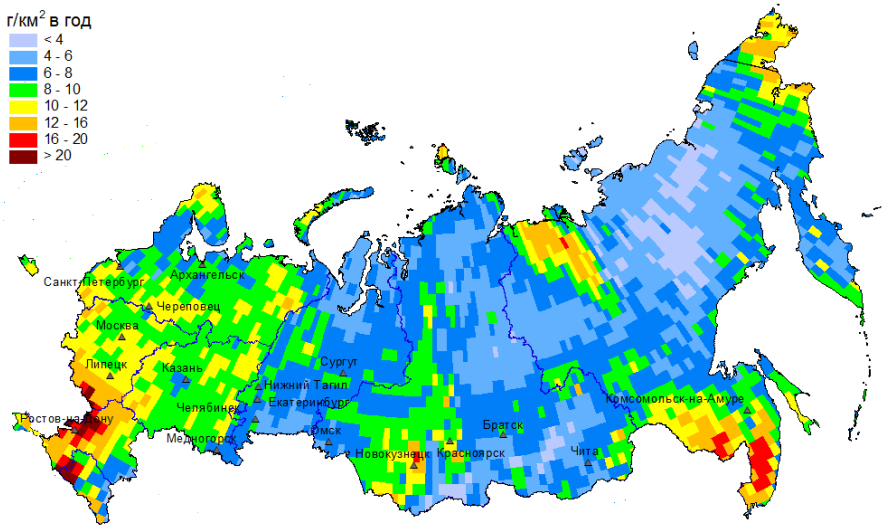
Отчет Метеорологического Синтезирующего Центра - Восток

Декабрь 2023 г.

Оценка трансграничного переноса и загрязнения территории России тяжелыми металлами и стойкими органическими загрязнителями

Гусев А.В., Ильин И.С., Розовская О.В., Стрижкина И.С.



МСЦ-В
Метеорологический синтезирующий центр - Восток
2-й Рощинский проезд, 8/4, 115419 Москва Россия
Телефон: +7 926 292 00 18
E-mail: msce@msceast.org
Сайт: www.msceast.org

РЕЗЮМЕ

Метеорологический Синтезирующий Центр «Восток» на протяжении длительного периода времени являлся одним из международных научно-исследовательских центров Совместной программы наблюдения и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих воздух веществ в Европе (ЕМЕП). МСЦ-В занимался выполнением оперативного моделирования и научных исследований по оценке уровней загрязнения воздуха тяжелыми металлами (ТМ) и стойкими органическими загрязнителями (СОЗ) в соответствии с предоставленным мандатом и согласованным планом работ в рамках программы ЕМЕП. Одной из основных задач МСЦ-В являлось обеспечение стран-участниц Конвенции данными об уровнях атмосферного загрязнения и трансграничных потоках ТМ и СОЗ. Для выполнения этой задачи в Центре был разработан программный комплекс, включающий модель атмосферного переноса и выпадений тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей GLEMOS (Global EMEP Multi-media Modelling System) и ряд утилит, позволяющих выполнять подготовку входных данных, а также обрабатывать и анализировать результаты моделирования. Кроме того, был накоплен большой объем информации, необходимой для расчетов и анализа долговременных изменений уровней загрязнения.

В настоящем отчете представлены результаты моделирования трансграничного переноса и уровней загрязнения территории России в 2021 году на примере ртути и бенз(а)пирена. Загрязнители выбраны в соответствии с их приоритетом в деятельности по сокращению загрязнения как в международных организациях (CLRTAP, HELCOM, OSPAR, AMAP, Minamata Convention, Stockholm Convention), так и на национальном уровне. Расчеты выполнены с помощью модели GLEMOS на основе официальных данных о выбросах программы ЕМЕП, экспертных оценок и национальных данных России. Приведена информация об уровнях концентраций в атмосфере и выпадений на подстилающую поверхность и их временной динамике начиная с 1990 года; о трансграничном переносе и вкладах субъектов РФ и зарубежных источников в загрязнение территории РФ, а также информация для оценки воздействия на экосистемы и здоровье населения.

Диапазон изменений среднегодовых концентраций ртути в воздухе в 2021 году составляет 1.3–2 нг/м^3. Сравнительно высокие концентрации ртути, отмеченные для ряда территорий, обусловлены либо влиянием значительных антропогенных источников (например, Кольский полуостров, Забайкальский край, Магаданская область), либо трансграничного переноса (например, Южный федеральный округ, Приморский край). Наиболее высокие потоки выпадений (>20 г/км^2/год) получены для Южного, запада Северо-Кавказского и юга Центрального федеральных округов. Результаты модели в основном соответствуют данным измерений концентраций ртути в атмосфере. Для повышения достоверности оценок загрязнения следует отметить важность расширения сети мониторинга ртути в атмосфере на территории России.

Среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в приземном слое воздухе на территории России по результатам расчетов для 2021 года меняются в значительном диапазоне 0.001 нг/м^3 до 2 нг/м^3 и более. Наиболее высокие концентрации бенз(а)пирена получены для Московской, Ленинградской, Ростовской областей, а также для отдельных городов (Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Липецк, Омск, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск,

Новокузнецк). Оценки уровней загрязнения выполнены как на основе данных по выбросам программы ЕМЕП, так и по национальным данным РФ. Сравнение результатов показало более высокие уровни концентраций и выпадений для Республики Крым и для Северо-Кавказского, Центрального, Южного, Сибирского и Приволжского федеральных округов, и более низкие уровни для Уральского и Северо-Западного федеральных округов в случае применения национальных данных. Вместе с тем, сопоставление с данными мониторинга показало заметные различия в пространственном распределении расчетных и измеренных концентраций бенз(а)пирена на территории России, в частности занижение концентраций в Уральском и Сибирском федеральных округах. Причины несоответствия могут быть связаны с неопределенностями оценок выбросов от источников в субъектах России, а также их пространственного распределения. Таким образом, для повышения надежности результатов моделирования требуется дальнейшее уточнение информации о выбросах бенз(а)пирена в России.

Оценки долговременных изменений годовых потоков выпадений ртути на территории федеральных округов России с 1990 по 2021 год показали в целом снижение уровней загрязнения. Наибольшее относительное снижение выпадений (около 35%) получено для Республики Крым, наименьшее снижение получено для Северо-Западного федерального округа. В отличие от ртути, долговременные изменения концентраций бенз(а)пирена на территории незначительны. В тоже время, данные регулярного мониторинга в городах показывают в среднем снижение концентраций на 14-16%. Для повышения достоверности оценок динамики уровней загрязнения бенз(а)пиреном в России необходима подготовка национальных данных по выбросам за длительный период времени.

Оценки трансграничного переноса ртути на территории России показали преобладающий вклад зарубежных источников в выпадения ртути (от 45% до 80%). Среди зарубежных стран наибольший вклад в выпадения ртути принадлежит источникам Китая (от 7% до 40%). Доля выпадений от собственных источников России сравнительно невелика (от 0.5% до 14%). По данным расчетов уровни загрязнения бенз(а)пиреном в федеральных округах России в основном формируются собственными источниками выбросов. Так, например, вклады в среднегодовые концентрации собственных источников в большинстве городов, входящих в федеральный проект «Чистый воздух», превышают 70%.

На основе моделирования сделаны оценки вкладов различных источников в загрязнение Арктики и окраинных морей. Вклад зарубежных источников в выпадения ртути на Арктику преобладает во всех арктических регионах России и меняется от примерно 50% (Магаданская область) до 67% (Ямало-Ненецкий автономный округ). Доля российских источников меняется от 11% в Красноярском крае до 34% в Магаданской и Архангельской областях. Расчеты трансграничного переноса бенз(а)пирена показывают, что вклад источников России в выпадения на Балтийское, Черное с Азовским и Каспийское моря составляет 9%, 16% и 26%, соответственно.

Данные модельных расчетов для 2021 года показывают превышение ПДК для среднегодовых концентраций бенз(а)пирена в Московской, Ленинградской, Ростовской областях, а также в отдельных городах (Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Липецк, Омск, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск, Новокузнецк). Наибольшее количество превышений

среднесуточного значения ПДК отмечается для холодного периода года. Оценки выпадений ртути на отдельные типы подстилающей поверхности в федеральных округах России и Республике Крым показывают наиболее высокие величины потоков для лесов и городской застройки.

Представленные результаты могут быть использованы для анализа уровней загрязнения в России и их временной динамики, вкладов различных источников и секторов экономики, а также для оценки воздействия на экосистемы и здоровье населения. Дальнейшая разработка и уточнение применяемых модельных подходов, а также используемых данных по выбросам и данных мониторинга позволят повысить достоверность оценок загрязнения территории России и способствовать формированию мер по его сокращению.

Настоящий отчет иллюстрирует возможности применения разработанного программного комплекса GLEMOS для различных задач, связанных с исследованием уровней загрязнения окружающей среды токсичными загрязнителями. Вместе с тем, область применения GLEMOS может быть расширена за счет включения в расчеты других загрязнителей (например, аэрозольные частицы, окислы серы и азота, потенциально опасные химические вещества, микропластик).

СОДЕРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ 3

БЛАГОДАРНОСТИ 8

ВВЕДЕНИЕ 9

1. ДАННЫЕ ПО ВЫБРОСАМ В АТМОСФЕРУ 11

2. ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ 15

2.1. Моделирование на основе данных о выбросах ЕМЕП 15

2.2. Моделирование на основе национальных данных РФ 18

3. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ 19

4. ОЦЕНКИ ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА И ВКЛАДОВ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЗАГРЯЗНЕНИЕ 22

4.1. Трансграничный перенос ртути 22

4.2. Трансграничный перенос бенз(а)пирена 24

4.3. Вклады источников в загрязнение Арктики и окраинных морей в пределах РФ 26

5. ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЭКОСИСТЕМЫ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ 28

5.1. Превышение ПДК бенз(а)пирена в регионах РФ 28

5.2. Выпадения на различные типы подстилающей поверхности 29

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 30

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 33

БЛАГОДАРНОСТИ

ЕМЕП/МСЦ-В выражает благодарность Правительству Российской Федерации за финансирование оперативной и исследовательской деятельности МСЦ-В по оценке загрязнения тяжелыми металлами и СОЗ в рамках ЕМЕП. Это позволило МСЦ-В подготовить данный отчет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач МСЦ-В в рамках работы программы ЕМЕП[1] являлось обеспечение стран-участниц данными об уровнях атмосферного загрязнения и трансграничных потоках тяжёлых металлов и стойких органических загрязнителей (СОЗ). Для выполнения этой задачи в Центре был разработан программный комплекс, включающий модель атмосферного переноса и выпадений тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей GLEMOS (Global EMEP Multi-media Modelling System) и ряд утилит, позволяющих выполнять подготовку входных данных, а также обрабатывать и анализировать результаты моделирования. Кроме того, был накоплен большой объем исходной информации, включая метеорологические данные, данные о выбросах, данные мониторинга и другие данные, необходимые для выполнения расчетов для различных временных периодов с 1990 года по настоящее время.

GLEMOS является моделью Эйлерова типа, которая может работать с различным пространственным разрешением от 3°x3° до 0.1°x0.1° и применяться как на глобальном, так и региональном масштабах, и для отдельных стран. GLEMOS имеет несколько важных особенностей, в частности, модульную структуру, гибкость в выборе расчетного домена, возможность использования вложенных доменов и описания распространения загрязнителей как в атмосфере, так и в других средах (почвы, водные объекты и растительность). В модели учитываются основные процессы, влияющие на уровни концентраций в воздухе и выведение из атмосферы загрязняющих веществ, такие так адвекция, турбулентная диффузия, сухое осаждение и выведение с осадками, атмосферная химия ртути и ряда СОЗ, взаимодействие с другими средами. Более подробная информация о модели GLEMOS представлена на сайте www.msceast.org.

Основной областью применения программного комплекса GLEMOS являлась регулярная оценка уровней загрязнения и трансграничного переноса загрязнителей в регионе ЕМЕП включая страны Европы, Средней Азии и территорию России (в пределах расчетной области ЕМЕП) [*Ilyin et al.*, 2022, 2023a]. Кроме того, модель привлекалась для расчетов долговременных изменений уровней загрязнения в регионе ЕМЕП [*Maas and Grennfelt*, 2016] и на глобальном уровне [*Travnikov et al.*, 2021], анализа вкладов различных секторов промышленности и хозяйственной деятельности в загрязнение [*Gusev et al.*, 2021], в работе различных международных организаций (AMAP [*AMAP/UN Environment*, 2019], HELCOM [*Gauss et al.*, 2022], OSPAR [*Ilyin et al.*, 2023b]) и научных проектов, в работах по оценке эффективности применения мер по сокращению уровней загрязнения ртутью в Минаматской Конвенции и СОЗ в Стокгольмской Конвенции [*Stockholm Convention*, 2017]. В дополнение к этому, для некоторых стран проводились более подробные исследования загрязнения с применением детального пространственного разрешения и дополнительных национальных данных (информация о выбросах, данные мониторинга загрязнения, метеорологическая информация) [*Ilyin et al.*, 2018, 2020].

В данной части отчета представлены результаты исследования трансграничного переноса и уровней загрязнения воздуха бенз(а)пиреном и ртутью для территории России в 2021 году. Расчеты бенз(а)пирена выполнены для территории России в пределах региона ЕМЕП (то есть,

[1] ЕМЕП - Совместная программа наблюдения и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих воздух веществ в Европе (ЕМЕП)»

до 90° в.д.). Для оценки уровней загрязнения ртути применялись расчёты в глобальном масштабе, включающие всю территорию России. В работе использованы границы территории России актуальные в 2021 году (с учётом Республики Крым). При расчётах трансграничного переноса в качестве российских регионов-источников рассматривались федеральные округа России и Республика Крым. Кроме того, для оценок трансграничного переноса бенз(а)пирена проводились отдельные расчёты с выделением Челябинской области и городов, входящих в федеральный проект «Чистый воздух» [https://национальныепроекты.рф]. В качестве регионов-рецепторов рассматривались территории федеральных округов и субъектов федерации России по состоянию на 2021 год.

Одним из ключевых видов исходной информации для моделирования являются данные о выбросах загрязняющих веществ. В данной работе использовались пространственно-распределённые данные по выбросам бенз(а)пирена и ртути, подготовленные Центром кадастров и прогнозов выбросов[2] (ЦКПВ) программы ЕМЕП. Для выбросов ртути за пределами региона ЕМЕП использовались данные программы UNEP[3] [*AMAP/UN Environment*, 2019]. Кроме того, для бенз(а)пирена был подготовлен дополнительный набор данных по выбросам, основанный на суммарных национальных данных по отдельным субъектам Российской Федерации. В расчетах также принимались во внимание природная эмиссия ртути, а также ре-эмиссия накопленных в природных средах ртути и бенз(а)пирена в атмосферу.

Метеорологическая информация для 2021 год была подготовлена с помощью метеорологического пре-процессора WRF[4] [*Skamarock и др.*, 2008] на основе данных оперативного анализа ЕЦСПП. Данные по типам подстилающей поверхности основаны на информации, полученной с помощью спутников MODIS[5] [*Friedli и др.*, 2019]. Данные по концентрациям примесей в атмосфере, вступающих в химические реакции с бенз(а)пиреном и ртутью, получены с помощью модели GEOS-Chem [*GEOS-Chem*, 2020].

Данная часть отчёта состоит из пяти глав. Подробное описание использованных данных по выбросам ртути и бенз(а)пирена представлено в Главе 1. Описание уровней загрязнения на территории России (концентраций в воздухе и выпадений) приведено в Главе 2. Третья глава содержит информацию об изменениях уровней загрязнения за последние три десятилетия. Глава 4 посвящена оценкам трансграничного переноса на территорию России от источников выбросов зарубежных стран, а также оценкам переноса между федеральными округами России. В пятой главе приведена информация, которая может быть использована для оценки вредного воздействия уровней загрязнения на природные экосистемы и здоровье населения. В разделе «Заключение» описаны текущие проблемы в области оценки уровней загрязнения тяжелыми металлами и СОЗ, а также возможное развитие оценок уровней загрязнения атмосферы.

[2] ЦКПВ - https://www.ceip.at/
[3] UNEP – UN Environment Programme, https://www.unep.org
[4] WRF - Weather Research & Forecasting Model, https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf
[5] MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, https://modis.gsfc.nasa.gov

1. ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Для проведения расчётов уровней загрязнения и трансграничных потоков бенз(а)пирена и ртути для территории России были использованы данные по выбросам, подготовленные ЦКПВ программы ЕМЕП, более подробно описанные в главе 1 первой части отчёта [*Ilyin et al.*, 2023]. На основе пространственно-распределённых величин выбросов были рассчитаны суммарные выбросы от федеральных округов России на 2021 год, а также отдельно представлены выбросы от источников Республики Крым. Кроме того, были выделены выбросы бенз(а)пирена от Челябинской области, которая использовалась в качестве примера оценки трансграничного переноса для отдельных субъектов федерации России.

В дополнение к наборам данных о выбросах на основе информации ЕМЕП для расчетов были подготовлены отдельные наборы данных, в которых оценки ЕМЕП для России были заменены национальными данными. Национальные данные России по выбросам загрязняющих веществ (2-ТП-«воздух») обновляются на регулярной основе и выкладываются в открытый доступ (https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/). Однако, национальные данные не содержат информации о пространственном распределении выбросов по регулярной сетке. Поэтому для создания набора данных, основного на национальной отчётности, сохранялось пространственное распределение выбросов, принятое в ЕМЕП. Суммарное значение национальных выбросов бенз(а)пирена распределялось пропорционально этому пространственному распределению. Данные о выбросах бенз(а)пирена по федеральным округам, использовавшиеся в расчётах, приведены в Таблице 1. Наибольшая разница отмечается для Северо-Западного федерального округа, где выбросы на основе национальных данных в 27 раз меньше данных ЕМЕП. В тоже время, выбросы бенз(а)пирена по национальным данным в Республике Крым в 16 раз, Сибирском федеральном округе в 4.5 раза, в Северо-Кавказском федеральном округе в 3.7 раза и в Центральном федеральном округе в 2.8 раза выше по сравнению с данными ЕМЕП. В целом суммарные годовые выбросы бенз(а)пирена на территории России в пределах региона ЕМЕП в 2021 году в 2 раза выше, чем по данным ЕМЕП.

Таблица 1. *Суммарные значения выбросов бенз(а)пирена (регион ЕМЕП) в федеральных округах России в 2021 году по данным программы ЕМЕП и национальным данным РФ.*

Федеральный округ	Бенз(а)пирен (данные ЕМЕП), тонн в год	Бенз(а)пирен (данные России), тонн в год
Центральный	30.36	85.7
Северо-Западный	11.26	0.41
Южный[1)]	11.64	19.12
Уральский	11.32	5.26
Приволжский	24.31	35.74
Северо-Кавказский	7.53	28.30
Сибирский[2)]	10.26	46.20
Дальневосточный[3)]	-	-
Республика Крым	0.31	5.1
Россия (всего[2)])	106.81	225.83

[1)] Без Республики Крым

[2)] В пределах расчётной области ЕМЕП

[3)] Находится вне пределов расчётной области ЕМЕП

Федеральный проект «Чистый воздух» предполагает сокращение выбросов на 20% в 10 наиболее загрязнённых городах России[6]. Поэтому в расчётах атмосферного переноса и выпадений бенз(а)пирена были выделены города, входящие в эту программу (Липецк, Череповец, Омск, Новокузнецк, Медногорск, Челябинск, Нижний Тагил) как отдельные источники (Таблица 2). В данной работе к выбросам от этих городов были приписаны величины выбросов в ячейках регулярной сетки, которые перекрываются территорией этих городов. Поэтому данные, использованные в работе, могут не совпадать с официальными данными выбросов бенз(а)пирена в этих городах.

Таблица 2. *Суммарные выбросы бенз(а)пирена в городах федерального проекта «Чистый воздух» (в пределах региона ЕМЕП) в 2021 году*

Федеральный округ	По данным ЕМЕП, тонн в год
Липецк	0.53
Череповец	0.21
Челябинск	0.67
Нижний Тагил	0.34
Медногорск	0.22
Омск	0.57
Новокузнецк	0.37

Для осуществления расчётов трансграничного переноса ртути на территории России использовались глобальные данные по выбросам ртути. В основе этих данных лежит инвентаризация, подготовленная в рамках программы по охране окружающей среды UNEP [*AMAP/UN Environment*, 2019]. При этом для территории, относящейся к региону ЕМЕП, были использованы данные ЕМЕП за 2021 год. Более подробно о подготовке глобальных данных по ртути можно узнать из первой части отчёта [*Ilyin et al.*, 2023]. Глобальные данные по ртути были разбиты на регионы-источники, исходя из принадлежности ячеек расчётной сетки той или иной стране. Помимо федеральных округов России, рассматривались выбросы от некоторых стран - крупных источников выбросов. Суммарные значения выбросов ртути, использовавшиеся в расчётах, приведены в Таблице 3.

Таблица 3*. Суммарные выбросы ртути в атмосферу в 2021 году от источников России и других стран.*

Россия (фед. округа)	Ртуть, тонн в год	Зарубежные источники	Ртуть, тонн в год
Центральный	1.30	Китай	564.8
Северо-Западный	2.01	Польша	7.6
Южный[1)]	4.22	Германия	6.2
Уральский	3.88	Турция	10.5
Приволжский	1.91	США	37.4
Северо-Кавказский	0.07	Канада	4.1
Сибирский	10.12	Ост. страны Азии	320.1
Дальневосточный	14.30	Ост. страны	1160.3
Республика Крым	0.01	Зарубежные страны (всего)	2110.9
Россия (всего)	37.8	Все страны	2148.7

[1)] без Республики Крым

[6] https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy_proekt_ekologiya/

Пространственное распределение выбросов бенз(а)пирена, подготовленное для расчётной области региона ЕМЕП, показано на Рис. 1. Распределение источников выбросов бенз(а)пирена по сетке в России выполнено на основе данных проекта Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR v6.0, https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_pop60). Согласно данным ЕМЕП, наибольшая плотность выбросов бенз(а)пирена характерна для наиболее населенных территорий. Например, в Москве и Санкт-Петербурге плотность выбросов превышает 500 г/км^2 в год. Регионы со сравнительно высокими выбросами (более 10 г/км^2 в год) отмечаются в основном в Центральном, Южном, Приволжском и Северо-Кавказском федеральных округах. На подавляющей части Северо-Западного, Уральского и Сибирского округов плотность выбросов невелика в силу малой плотности населения.

Плотность выбросов, полученная на основании национальной статистики, сильно меняется в пространстве. Наиболее значительные выбросы отмечаются в Центральном Федеральном округе для Московской, Владимирской, Ивановской, Брянской области. В Южном Федеральном округе наибольшая плотность выбросов характерна для Ростовской и Астраханской области и Республики Крым. В Приволжском округе к регионам со сравнительно высокими выбросами относятся Нижегородская, Самарская области, Республика Марий Эл и Республика Башкортостан. В Северо-Кавказском федеральном округе отмечается Ставропольский край, а в Уральском - Курганская область, а. Сибирском округе - Новосибирская область.

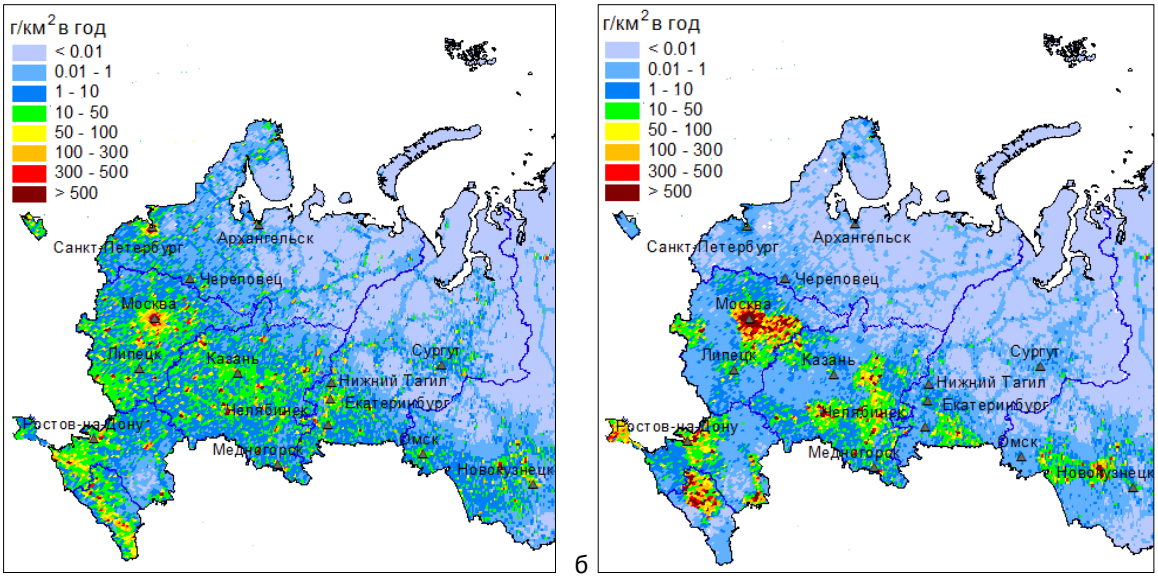


Рисунок 1. *Пространственное распределение выбросов бенз(а)пирена в России в соответствии с данными ЕМЕП (а) и национальных оценок (б) в 2021 году.*

Пространственное распределение выбросов ртути по территории России сформировано с использованием двух источников данных. Для части России, входящей в регион ЕМЕП, использовались данные ЕМЕП. Для остальной части использовались оценки UNEP [*AMAP/UN Environment*, 2019]. Выбросы ртути с пространственным шагом в 1°x1° показаны на Рис. 2. Наиболее значительные выбросы связаны с теми ячейками регулярной сетки, в которых расположены крупные промышленные источники. Например, в Центральном федеральном

округе наиболее крупные выбросы ртути оценены для Рязани, Москвы и Костромской области. В Северо-Западном федеральном округе выбросы выше 50 г/км^2 в год отмечены для Архангельской области (г. Северодвинск) и Мурманской области (район городов Кировск, Апатиты). Зона сравнительно высоких выбросов (1 – 50 г/км^2 в год) характерна для Уральского федерального округа (Свердловская и Челябинская области). В некоторых районах этих областей выбросы превышают 50 г/км^2 в год. Такие же значительные выбросы отмечены для Ханты-Мансийского автономного округа (г. Нягань). В Приволжском федеральном округе наиболее значительные выбросы ртути оценены для Кировской области и Республике Башкортостан. На большей части Южного федерального округа выбросы не превышают 1 г/км^2 в год, за исключением Ростовской области, где в районах восточнее Ростова-на-Дону выбросы превышают 50 г/км^2 в год. В Северо-Кавказском федеральном округе плотность выбросов не превышает 1 г/км^2 в год за исключением некоторых районов Ставропольского края и Республики Дагестан. В Сибирском федеральном округе повышенные выбросы отмечаются для южной части Красноярского края. Высокие выбросы в Магаданской области и Чукотском автономном округе обусловлены кустарной добычей золота, согласно данным, представленным в отчёте [*AMAP/UN Environment*, 2019].

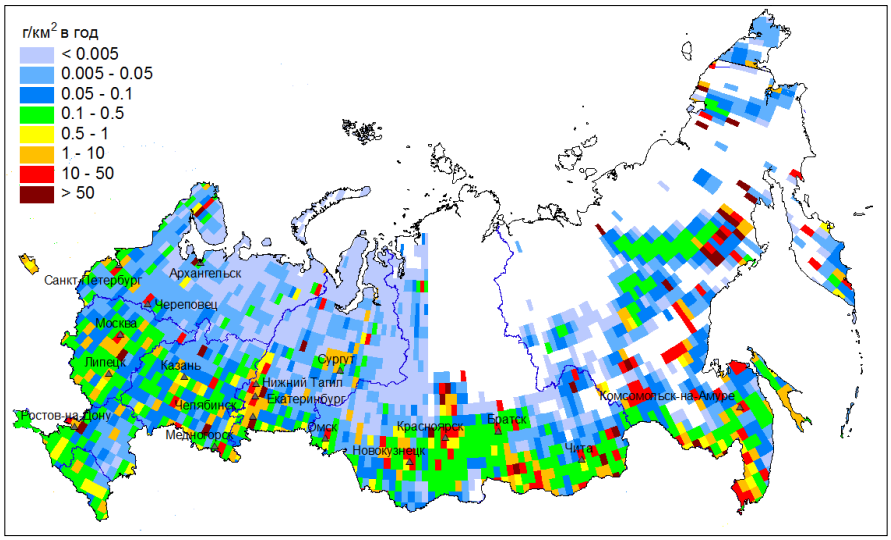


Рисунок 2. *Пространственное распределение суммарных выбросов ртути в атмосферу в России в 2021 году.*

2. ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

2.1. Моделирование на основе данных о выбросах ЕМЕП

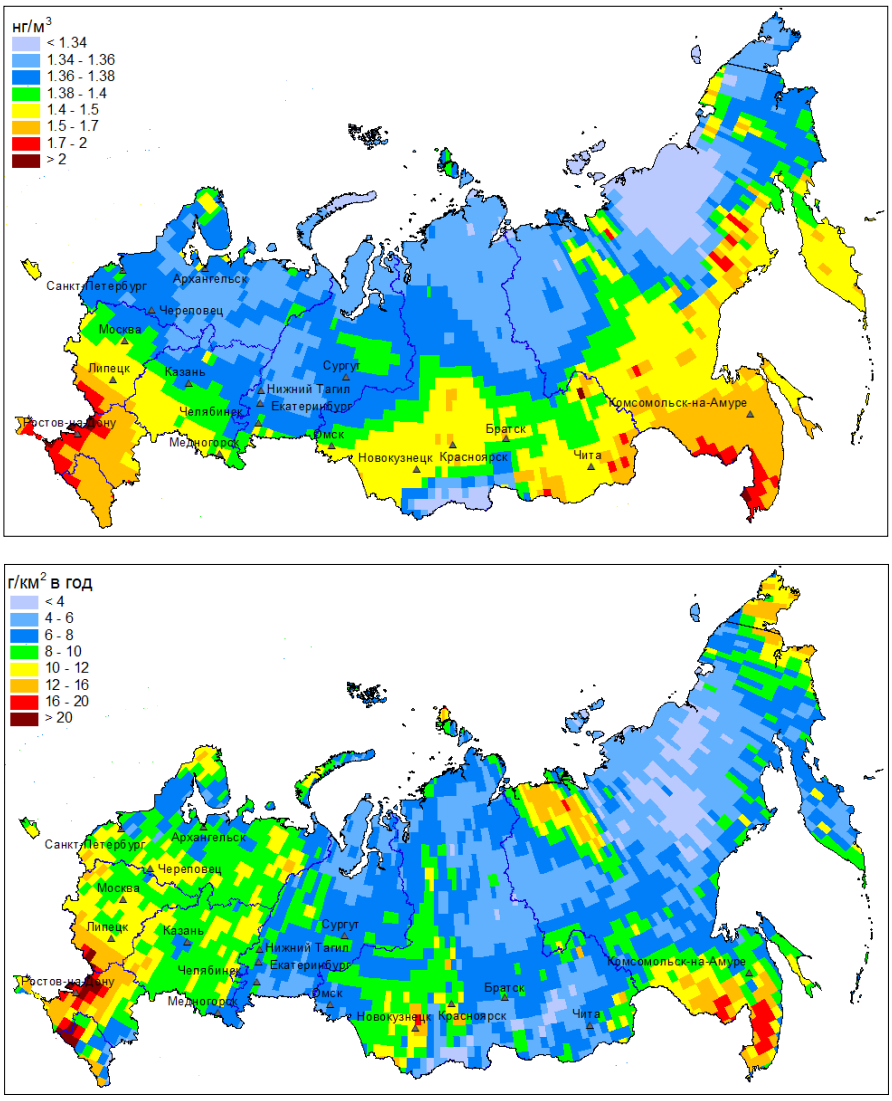
Расчёты, выполненные с помощью модели атмосферного переноса, позволяют оценить уровни загрязнения тяжёлыми металлами и стойкими органическими соединениями в различных регионах страны. В частности, моделирование позволяет определить концентрации загрязнителей в приземном слое воздуха и в осадках, поступление из атмосферы (выпадения) на различные виды подстилающей поверхности, а также трансграничные потоки и вклады отдельных источников в уровни загрязнения.

Пространственное распределение приземных концентраций ртути показано на Рис. 3а. Диапазон изменений среднегодовых концентраций ртути в приземном слое воздухе составляет 1.3 - 2 нг/м^3. Сравнительно небольшой диапазон концентраций обусловлен глобальным характером распространения ртути в атмосфере. Основная часть ртути в атмосфере присутствует в виде сравнительно инертной элементарной формы, со временем жизни в атмосфере около года. Такое большое время жизни обуславливает значительное перемешивание ртути в пределах тропосферы земного шара. Территории со сравнительно высокими концентрациями ртути обусловлены либо влиянием значительных антропогенных источников (например, Кольский полуостров, Забайкальский край, Магаданская область), либо трансграничного переноса (например, Южный федеральный округ, Приморский край).

Измеренные значения концентраций ртути воздухе опубликованы для станции комплексного фонового мониторинга «Приокско-Террасный заповедник», расположенный в южной части Московской области [*Черногаева и др.,* 2021, 2022]. Измеренные среднегодовые концентрации ртути на этой станции составляют 1.36, 0.51 и 1.60 нг/м^3 за 2019-2020, 2021 и 2022 годы, соответственно. Расчётные среднегодовые значения концентраций ртути для 2019, 2020 и 2021 года, полученные с помощью глобальной версии модели GLEMOS, составляют 1.53, 1.43 и 1.40 нг/м^3. Так как ртуть имеет значительное время жизни в атмосфере и, следовательно, глобальный характер распространения в тропосфере, ее фоновые концентрации в северном полушарии составляют около 1.3 – 1.6 нг/м^3 и в южном – около 1 нг/м^3 [*AMAP/UN Environment*, 2019]. Например, измеренные концентрации ртути на станциях ЕМЕП в 2021 году составили 1.2 – 1.7 нг/м^3. При этом средние за месяц концентрации варьировали от -20% до +40%. Поэтому измеренная в 2021 году концентрация ртути в Приокско-Террасном заповеднике 0.51 нг/м^3 выглядит заниженной.

Пространственное распределение выпадений ртути на территорию России в 2021 году приведено на Рис. 3б. Выпадения ртути формируются в основном за счёт её короткоживущих форм, таких как партикулярная и газовая окисленная ртуть. Эти формы происходят либо за счёт антропогенных выбросов, либо благодаря химическими трансформациям ртути в атмосфере. Градиенты потоков выпадений ртути более значительные, чем у концентраций в воздухе. Наименьшие потоки выпадений (4 – 8 г/км^2 в год) характерны в основном для большей части АТР. Наиболее высокие потоки выпадений (>20 г/км^2 в год) отмечаются для Южного, запада Северо-Кавказского и юга Центрального федеральных округов. Обширные территории с выпадениями 16 – 20 г/км^2 в год имеют место на юге Дальневосточного федерального округа (Приморский край, Еврейская АО). На большей части ЕТР потоки выпадений составляют 8 – 16

г/км^2 в год. В некоторых Арктических регионах России (Чукотский АО, северо-запад Якутии, север архипелага Северная Земля) отмечаются повышенные потоки выпадений, не связанные с антропогенными источниками или дальним переносом ртути. Эти зоны повышенных выпадений обусловлены весенней деплецией ртути (AMDE – atmospheric mercury depletion events) [*Steffen и др.*, 2008].



а

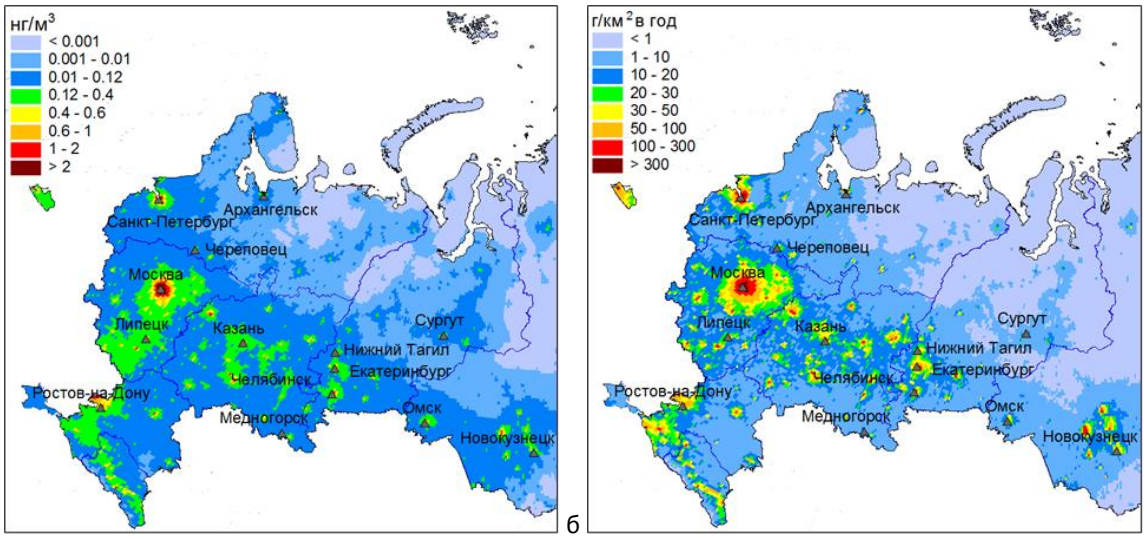
б

Рисунок 3. *Среднегодовые концентрации ртути в приземном слое воздуха (а) и поток суммарных годовых выпадений ртути (б) в 2021 году.*

Измеряемой величиной, характеризующей выпадения ртути, является концентрация в осадках. При умножении концентрации в осадках на сумму осадков получают поток влажных выпадений. Измерения концентраций ртути в осадках в России проводятся на пяти станциях комплексного фонового мониторинга: Приокско-Террасный, Кавказский, Воронежский и Астраханский биосферные заповедники и станция Яйлю. Измеренные концентрации в осадках в 2021 году на этих станциях составили от 120 нг/л в Воронежском заповеднике до 910 нг/л в Астраханском заповеднике. Рассчитанные концентрации существенно ниже измеренных и варьируют от 8 до 14 нг/л, что сопоставимо с измерениями на фоновых станциях ЕМЕП в 2021

году (3 – 11 нг/л). Значительные расхождения между рассчитанными и измеренными на российских станциях величинами могут быть связаны как с неопределённостями выбросов, так и с особенностями измерений. Для более точного определения причин расхождений требуются отдельные исследования.

Пространственное распределение приземных концентраций бенз(а)пирена показано на Рис. 4а. Среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в приземном слое воздухе на территории России меняются в значительном диапазоне от 0.001 нг/м^3 до 2 нг/м^3 и более. Большой диапазон изменений концентраций обуславливается сравнительно коротким временем жизни бенз(а)пирена в атмосфере, что связано с его химическими трансформациями за счет реакций с атмосферными оксидантами. Бенз(а)пирен в основном присутствует в атмосфере в составе мелких взвешенных частиц. Территории с высокими концентрациями бенз(а)пирена обусловлены влиянием значительных антропогенных источников, например, Московская, Ленинградская, Ростовская области, а также отдельные города (Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Липецк, Омск, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск, Новокузнецк).



а б

Рисунок 4. *Среднегодовые концентрации в приземном слое воздуха (а) и потоки выпадений бенз(а)пирена (б) в 2021 году, рассчитанные на основе данных о выбросах программы ЕМЕП*

Пространственное распределение суммарных годовых выпадений бенз(а)пирена на территорию России в 2021 году приведено на Рис. 4б. Потоки выпадений бенз(а)пирена, как и концентрации, меняются в значительном диапазоне от примерно 1 г/км^2 до 200 и более г/км^2. В целом, поле выпадений соответствует пространственному распределению концентраций бенз(а)пирена в воздухе. Наибольшие значения выпадений получены для Московской, Ленинградской, Ростовской областей. Значительные величины потоков получены также для отдельных городов, таких как, например, Липецк, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск и других. Выпадения бенз(а)пирена формируются в основном за счёт его аэрозольной формы.

2.2. Моделирование на основе национальных данных РФ

Пространственное распределение приземных концентраций в воздухе и выпадений бенз(а)пирена в 2021 году, полученное на основе национальных данных о выбросах, показано на Рис. 5.

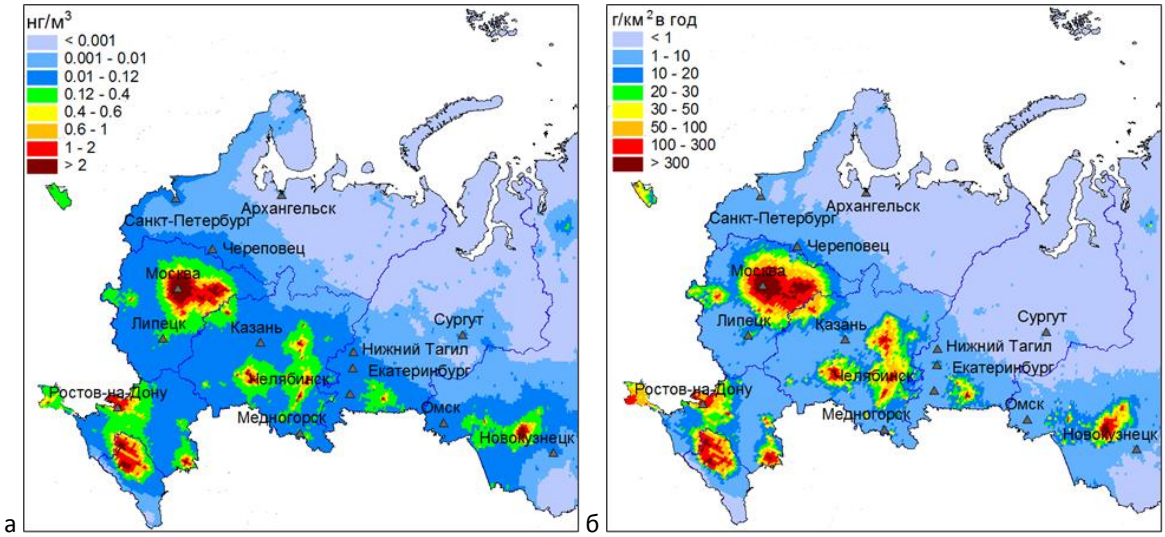


Рисунок 5. *Среднегодовые концентрации в приземном слое воздуха (а) и потоки выпадений бенз(а)пирена (б) в 2021 году, рассчитанные на основе национальных данных России о выбросах бенз(а)пирена в атмосферу.*

Среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в приземном слое воздухе на территории России в расчетах по национальным данным России и данным программы ЕМЕП характеризуются заметными различиями (Рис. 6).

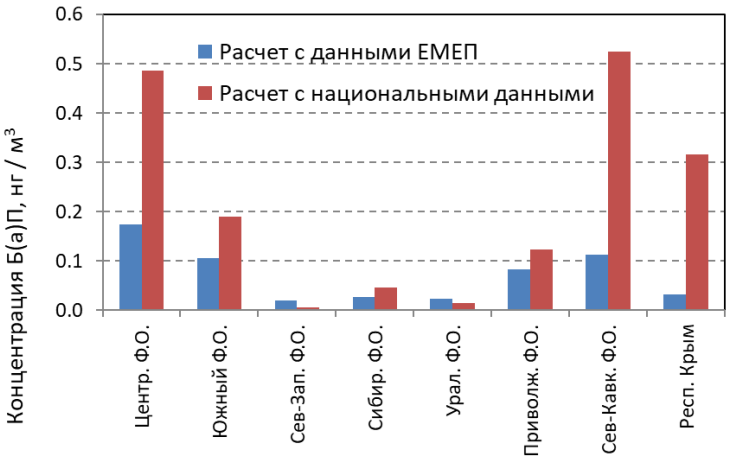


Рисунок 6. *Среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в приземном слое воздуха в федеральных округах России в 2021 году по данным расчетов на основе данных о выбросах ЕМЕП и национальных данных.*

В частности, наибольшая разница получена для Республики Крым, где средний уровень концентраций на основе национальных данных выше данных расчета с использованием

оценок выбросов ЕМЕП в 9.5 раз. Также, более высокие уровни загрязнения в расчетах по национальным данным получены для Северо-Кавказского, Центрального, Южного, Сибирского и Приволжского федеральных округов. В тоже время для Северо-Западного и Уральского федеральных округов расчеты с национальными данными показывают более низкие уровни загрязнения.

Пространственное распределение суммарных годовых выпадений бенз(а)пирена в 2021 по данным расчетов на основе национальных данных показано на Рисунке 5б. В целом, оценки выпадений по национальным данным имеют близкий характер различий, как и пространственное распределение концентраций бенз(а)пирена в воздухе.

Данные мониторинга уровней загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном в городах показывают значительно более высокие концентрации в Азиатской части России по сравнению с ее Европейской частью [*Ануфриева и др.*, 2022]. Так, среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в городах Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов превышают концентрации в Европейской части России в среднем в 9 раз. Одной из причин таких различий является использование угля на большей части генерирующих мощностей в восточной части России.

Сравнение данных расчетов с данными мониторинга свидетельствует о несоответствии пространственного распределения измеренных и расчетных среднегодовых концентраций бенз(а)пирена. Результаты моделирования на основе данных ЕМЕП и национальных данных показывают высокие уровни загрязнения в Центральном, Южном и Северо-Кавказском федеральном округах. В тоже время в Уральском и Сибирском федеральных округах расчетные уровни заметно ниже. Причиной несоответствия пространственного распределения результатов модели и измерений могут являться неопределенности оценок суммарных выбросов от источников в субъектах России, а также их пространственного распределения. Таким образом, для улучшения соответствия модельных и измерительных данных требуется дальнейшее уточнение информации о выбросах бенз(а)пирена в России.

3. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Информация о долговременных изменениях (трендах) уровней загрязнения ртути и бенз(а)пирена на территории России подготовлена для периодов 1990-2021 г.г. и 1990-2021 г.г., соответственно. Оценки трендов представлены для территорий федеральных округов и субъектов федерации России в пределах региона ЕМЕП.

Изменения годовых потоков выпадений ртути на территории федеральных округов России показаны на Рис. 7. Как правило, отмечается тенденция к снижению выпадений за последние три десятилетия. Межгодовые колебания обусловлены в первую очередь межгодовой изменчивостью метеорологических условий, таких как величины осадков, температура воздуха и атмосферный перенос. При этом общая тенденция к снижению обусловлена снижением выбросов ртути как в России, так и в зарубежных странах.

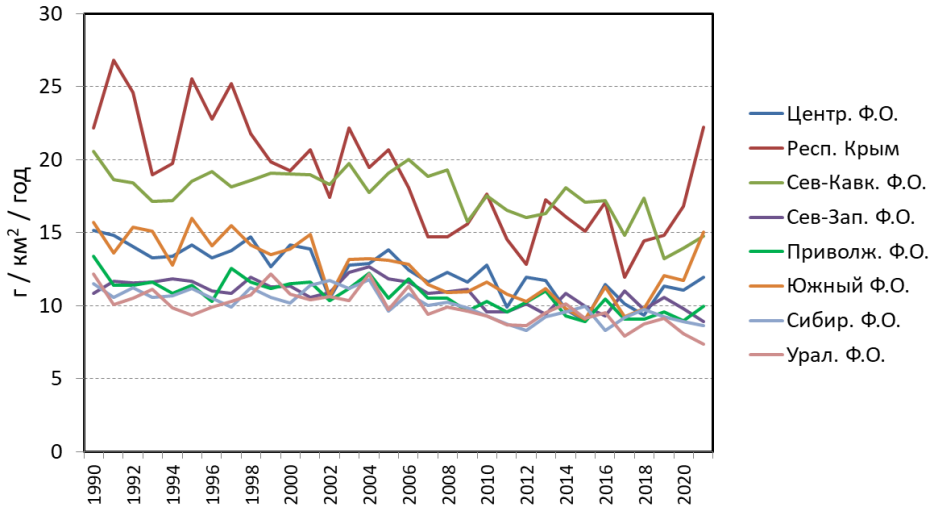


Рисунок 7. *Долговременные изменения потоков выпадений ртути в федеральных округах России и Республике Крым с 1990 по 2021 год.*

Временная динамика выпадений в отдельных субъектах федерации, входящих в тот или иной федеральный округ, могут заметно отличаться от средних величин по федеральному округу. В качестве примера можно посмотреть на изменения выпадений ртутит в Центральном федеральном округе (Рис. 8). В среднем по округу выпадения снизились от примерно 15 до 12 г/км^2 в год с 1990 по 2021 год. При этом разброс выпадений, средних по областям, входящих в Центральный федеральный округ, составляет 12 – 24 г/км^2 в год в 1990 году и 9 – 25 г/км^2 в год в 2021. Заметный рост выпадений в конце рассматриваемого периода связан с выпадениями в Белгородской области. Эти выпадения в значительной степени обусловлены трансграничным переносом от источников Украины.

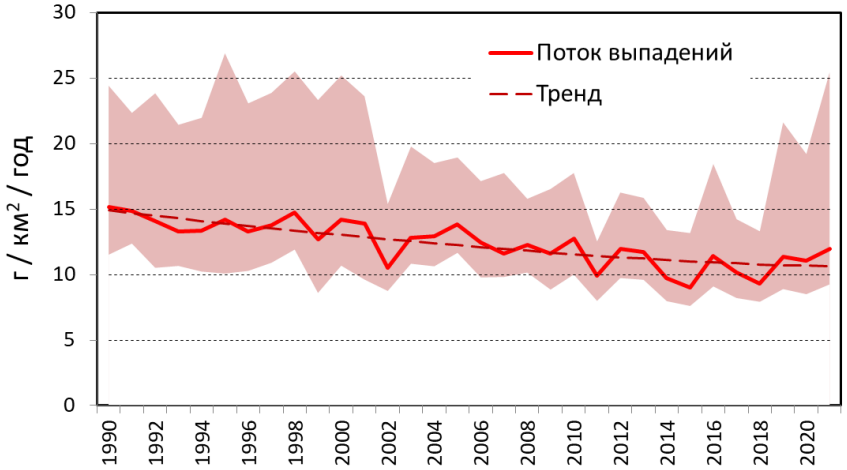


Рисунок 8. *Потоки выпадений ртути в Центральном федеральном округе и тренд за 1990 – 2021 год. Закрашенная область обозначает разброс средних потоков по областям, входящим в Центральный федеральный округ.*

Долговременные изменения выпадений для каждого региона были проанализированы, используя подходы, описанные в работе [*Collette et al.*, 2016]. Для описания долговременной

тенденции применялась би-экспоненциальная аппроксимация, позволяющая воспроизводить более быстрое снижение выпадений в начальной части рассматриваемого периода, и более плавное снижение в конце его. Оценивалось снижение выпадений за период, а также средняя, минимальная и максимальная скорости снижения выпадений. Наибольшее относительное снижение выпадений (около 35%) имело место в Республике Крым, наименьшее – в Северо-Западном федеральном округе (Рис. 9).

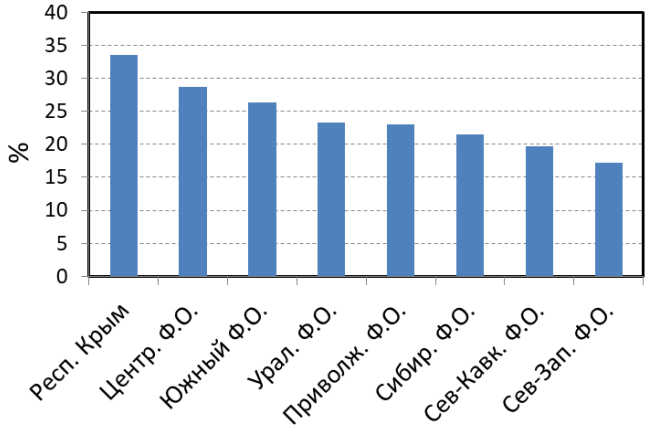


Рисунок 9. *Снижение выпадений ртути (% относительно 1990 г.) в федеральных округах России и Республике Крым за 1990 – 2021 годы.*

Аналогичный анализ был применён к концентрациям бенз(а)пирена в 1990 – 2020 годах. В отличие от ртути и ряда других тяжёлых металлов, долговременные изменения концентраций бенз(а)пирена сравнительно невелики (Рис. 10). Наибольшее снижение (5%) отмечено в Республике Крым и Приволжском федеральном округе. В Северо-Западном федеральном округе отмечается рост концентраций в 13%. Вместе с тем, данные регулярного мониторинга бенз(а)пирена в городах показывают в среднем снижение концентраций на 14-16% [*Черногаева и др.*, 2022].

Следует отметить, что в расчетах долговременных изменений уровней концентраций бенз(а)пирена на территории России были использованы данные о выбросах, подготовленные ЦКПВ программы ЕМЕП. Эти экспертные оценки были сделаны для одного 2020 года. Информация об изменении выбросов в период 1990-2019 отсутствовала на момент проведения расчетов. Таким образом, изменения концентраций бенз(а)пирена на территории России с 1990 по 2020 год, полученные на основе расчетов, характеризуют влияние временных изменений выбросов зарубежных источников и метеорологических условий. Для более достоверной оценки динамики уровней загрязнения бенз(а)пиреном в России необходима подготовка национальных данных по выбросам за длительный период времени.

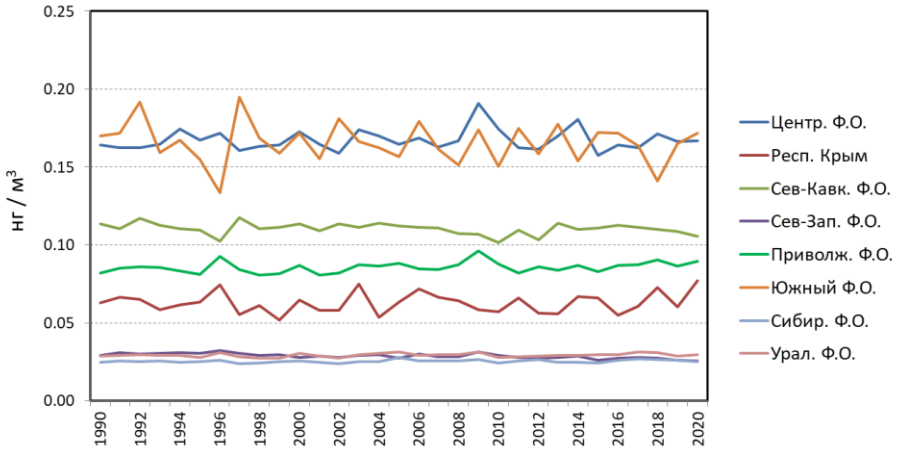


Рисунок 10. *Долговременные изменения среднегодовых концентраций бенз(а)пирена.*

4. ОЦЕНКИ ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА И ВКЛАДОВ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ позволяют определить вклады отдельных источников выбросов в суммарные уровни загрязнения и выявить основные источники загрязнения, что может способствовать выстраиванию оптимальной стратегии снижения выбросов. Под источниками подразумеваются как выбросы в отдельных странах, регионах или городах, так и выбросы от отдельных секторов хозяйственной деятельности, или от отдельных предприятий.

4.1. Трансграничный перенос ртути

На основе математического моделирования для каждого из федеральных округов России была произведена оценка вкладов в выпадения ртути за счёт источников других федеральных округов, зарубежных источников (трансграничный перенос) и природных источников. Вклады для Республики Крым вычислялись отдельно, а Южный федеральный округ рассматривался без учёта Крыма. Вклады в выпадения от зарубежных источников составляют от 65% в Уральском федеральном округе до 86% в Республике Крым (Рис. 11).

Преобладающий вклад зарубежных источников в выпадения ртути на территории России объясняется тем, что ртуть является загрязнителем глобального распространения. Более 80% антропогенных выбросов ртути в атмосферу представлено долгоживущей элементарной формой, способной распространяться по тропосфере всего земного шара. При этом доля российских источников в глобальных выбросах составляет около 2%. Это приводит к тому, что основные выпадения ртути на территории России происходят за счёт переноса из других стран. Китай характеризуется самыми значительными выбросами ртути, и их вклад составляет 26% от глобальных антропогенных выбросов. Поэтому вклад его источников достаточно значим в суммарных выпадениях на территории России. Вклад источников Китая варьируется от 7% в Южном федеральном округе и Республике Крым до 40% в Дальневосточном федеральном округе.

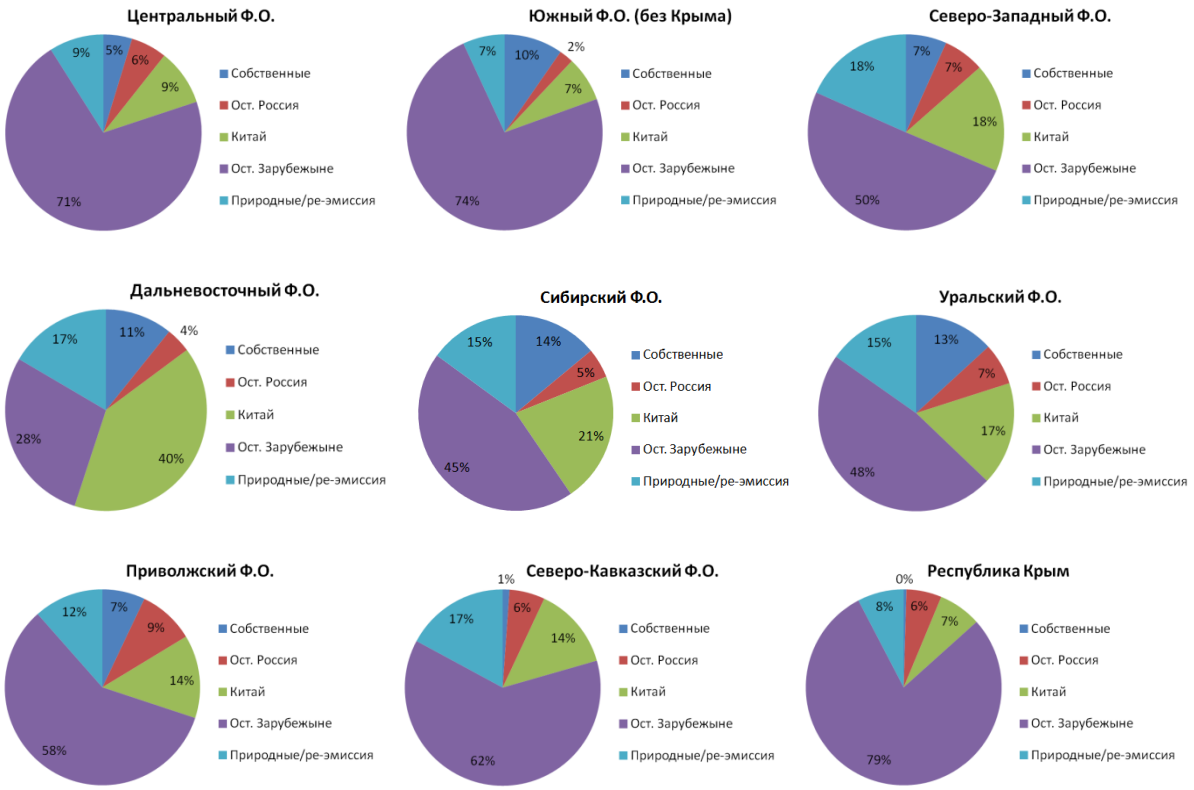


Рисунок 11. *Вклады в выпадения ртути на территории федеральных округов и Республику Крым от собственных, других российских, зарубежных и природных источников в 2021 году.*

Доля выпадений от собственных источников на территории федеральных округов меняется от 0.5% в Республике Крым до 14% в Сибирском федеральном округе. Эта величина зависит от ряда факторов, таких как соотношение величин выбросов внутри региона и в соседних регионах, площади региона, соотношению форм ртути в выбросах, метеорологических особенностях и т.д. Вклад природных источников и ре-эмиссии в суммарные выпадения составляет 7 – 17%.

В качестве региона-приёмника трансграничного переноса может быть рассмотрен практически любой пространственный объект, например, страна в целом, её отдельные административные единицы, акватории морей и озёр, водосборы речных систем и. д. В данной работе были вычислены вклады различных источников в выпадения на отдельные субъекты федерации России для 2021 года. На рис. 12а в качестве примера приведены оценки вкладов в выпадения на Архангельскую область и Хабаровский край. Вклад российских источников в выпадения ртути на территорию Архангельской области составляет 20%, из которых 13% приходится на Северо-западный федеральный округ, по 2% - на Центральный и Приволжский округа (Рис. 5.2а). Около 2/3 выпадений обусловлено зарубежными источниками, причём 17% приходится на выбросы Китая. В Хабаровском Крае, граничащем с Китаем, доля источников Китая составляет почти половину от суммарных выпадений (Рис. 12б).

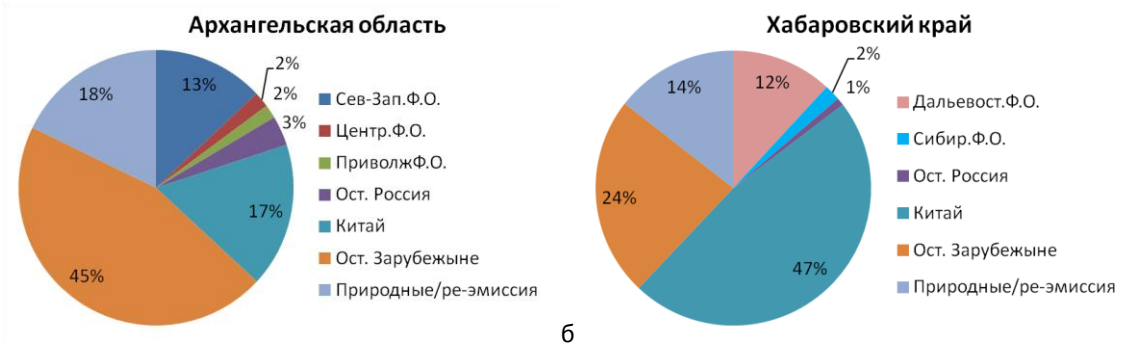


Рисунок 12. *Вклады в выпадения ртути на территории Архангельской области (а) и Хабаровского края (б) от источников в федеральных округах России, а также зарубежных и природных источников.*

Вклады в выпадения на территорию отдельных федеральных округов или субъектов федерации характеризуют влияние трансграничного переноса в среднем по региону. При этом вклады трансграничного переноса могут значительно меняться в пространстве. Вблизи государственных границ вклады зарубежных источников в суммарные выпадения ртути превышают 95%, при этом в центральных регионах страны, особенно вблизи крупных национальных источников, вклад зарубежных источников не превышает 40% (Рис. 13).

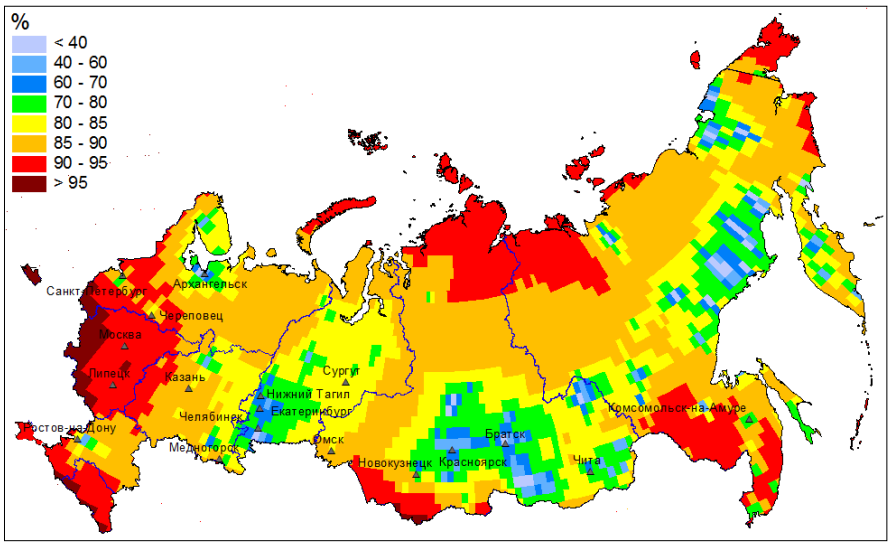


Рисунок 13. *Вклады зарубежных источников в суммарные выпадения ртути на территорию России в 2021 году.*

4.2. Трансграничный перенос бенз(а)пирена

Оценки вкладов российских и зарубежных источников в концентрации бенз(а)пирена были сделаны для отдельных субъектов федерации России, а также для ряда городов, включённых в федеральный проект «Чистый воздух». В целом, вклад зарубежных источников в концентрации бенз(а)пирена меняется от 0.2% в Москве и Московской области до почти 70% в Калининградской области. Пример круговой диаграммы, показывающей вклады для

Челябинской области, показан на Рис. 14. Источники самой области обуславливают две трети средних за год концентраций бенз(а)пирена. Дополнительно 13% вносят источники самого города Челябинск. При этом вклад источников выбросов остальной части Уральского федерального округа (2%) существенно меньше, чем вклад соседнего Приволжского федерального округа (7%). Зарубежные источники (в основном, из Казахстана) вносят 7%.

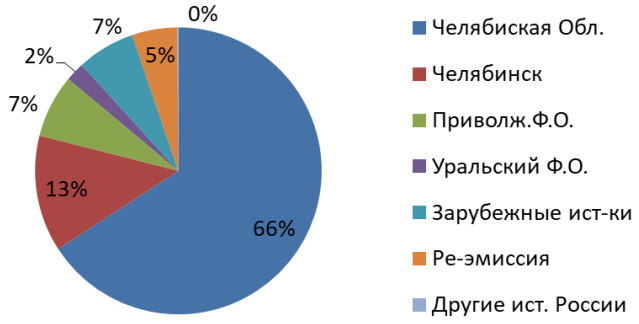


Рисунок 14. *Вклады в средние за год концентрации бенз(а)пирена на территории Челябинской области от российских и зарубежных источников в 2021 году.*

Вклады разных источников в среднегодовые концентрации бенз(а)пирена были оценены для городов, входящих в проект «Чистый воздух». В географический регион ЕМЕП попадают такие города, как Липецк, Череповец, Медногорск, Нижний Тагил, Челябинск, Омск и Новокузнецк. Для большинства городов доля вклада собственных источников превышает 70% (Рис. 15). Исключения составляют Череповец и Медногорск, где вклады собственных источников в суммарные концентрации бенз(а)пирена составляют около 5% и 40%, соответственно. Следующими по значимости выступают источники того федерального округа, в котором расположен город. Например, вклад источников выбросов Уральского федерального округа в суммарные концентрации в Нижнем Тагиле и Челябинске составляют 14% и 20%, соответственно. Исключением является Череповец, где основным вкладчиком (около 75%) являются источники Центрального федерального округа. Для двух из представленных городов отмечается превышение ПДК среднегодовыми концентрациями. Суточные превышения ПДК в разных городах проанализированы в разделе 6.1.

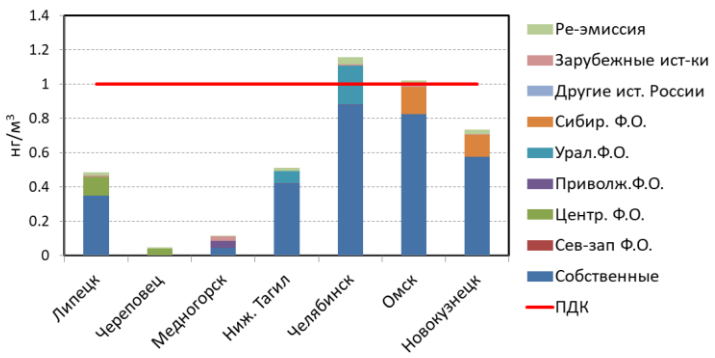


Рисунок 15. *Средние за год концентрации бенз(а)пирена и вклады от различных источников в концентрации в городах, входящих в проект «Чистый воздух» в 2021 году. ПДК – предельно-допустимая концентрация бенз(а)пирена 1 нг/м³.*

Говоря о вкладах различных источников в загрязнение того или иного региона важно понимать, что речь идёт об осреднённых по территории региона величинах. При этом величины вкладов могут существенно меняться по пространству самого региона. Например, вклады зарубежных источников в загрязнение бенз(а)пиреном территории России могут превышать 75% вблизи государственных границ, и составлять лишь несколько процентов в глубине территории страны (Рис. 16). При этом средний вклад зарубежных источников в загрязнение федеральных округов меняется от 1% в Северо-Кавказском округе до примерно 30% в Южном федеральном округе.

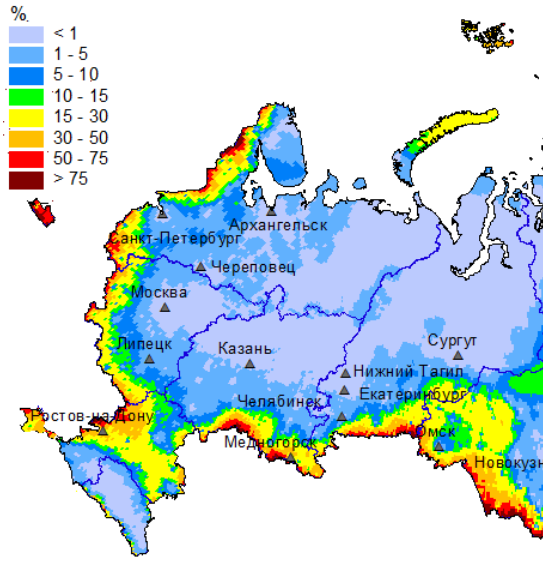


Рисунок 16. *Вклады зарубежных источников в средние за год концентрации бенз(а)пирена в России в 2021 году.*

4.3. Вклады источников в загрязнение Арктики и окраинных морей в пределах РФ

В настоящий момент освоение Арктики является одной из приоритетных задач России. При этом многократно отмечалось, что природа Арктика является уязвимой и требует бережного отношения. Поэтому при подготовке информации об уровнях атмосферного загрязнения предоставляются результаты расчётов выпадения ртути на Арктику в пределах России. Арктика рассматривается в границах, принятых в АМАП (Рис. 17).

Рисунок 17. *Граница Арктики (розовая линия), принятая в расчётах.*

Вклады от источников выбросов, расположенных в различных регионах России и мира, в выпадения ртути на территорию Арктики показаны на Рис. 18. Субъекты федерации России, показанные на рисунке, не обязательно полностью входят в зону Арктики. Суммарный вклад

зарубежных источников в выпадения на Арктику преобладает во всех арктических регионах и меняется от примерно 50% (Магаданская область) до 67% (Ямало-Ненецкий автономный округ). Среди зарубежных стран основным источником является Китай, чей вклад составляет от 14 до 31%. Вклад источников выбросов ртути США варьирует от 2% до 4%, и вклад Канады составляет меньше 1%. Доля российских источников меняется от 11% (Красноярский край) до 34% (Магаданская и Архангельская области). Как правило, основным российским вкладчиком в выпадения в регионе России является тот федеральный орган, где регион расположен. Таким образом, для Чукотского автономного округа, Камчатского края Магаданской области основным источником выпадений ртути является Дальневосточный федеральный округ, для Мурманской и Архангельской областей и республик Коми и Карелия – Северо-Западный федеральный округ, и т.д. Вклад природных источников и ре-эмиссии варьирует от 15 до 24%.

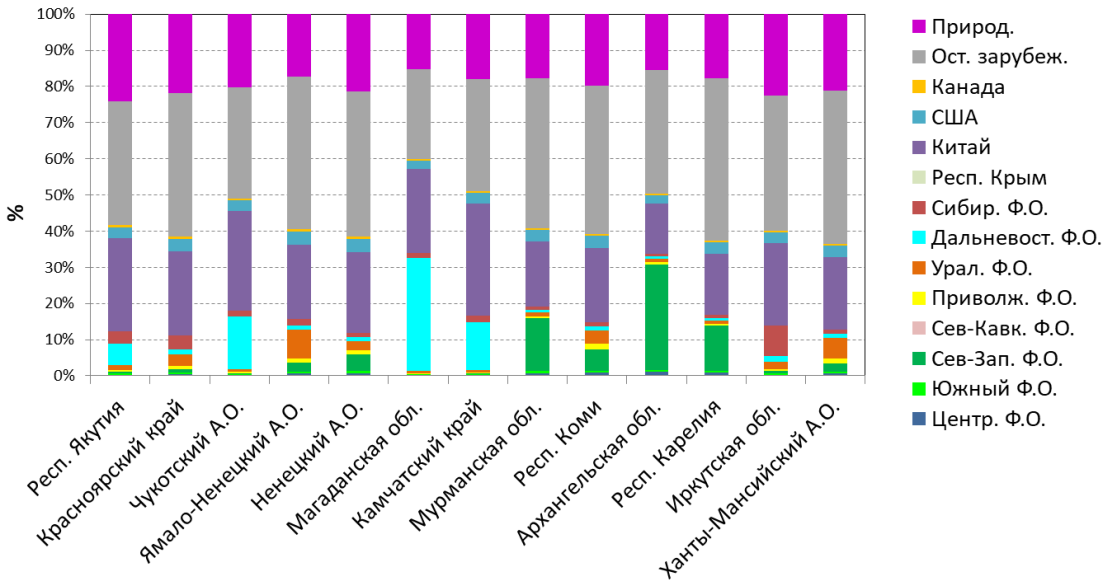


Рисунок 18. *Вклады (%) в суммарные выпадения ртути в регионах России, частично или полностью входящих в Арктику.*

Потоки выпадений на акватории окраинных морей и оценка вкладов от источников стран в выпадения оцениваются регулярно. В данной работе были оценены вклады в выпадения бенз(а)пирена на Балтийское, Черное (с Азовским) и Каспийское моря от российских источников, расположенных в различных федеральных округах и Республике Крым, и от зарубежных источников.

Основной страной-источником атмосферного поступления бенз(а)пирена на акваторию Балтийского моря является Польша, чей вклад составляет 36% (Рис. 19а). Финляндия и Дания являются другими значительными странам-источниками атмосферных выпадений. Вклад российских источников, расположенных главным образом в Северо-Западном федеральном округе, составляет 9%. Около трети выпадений на Черное и Азовское моря обусловлены источниками выбросов Украины, и 28% - Турции (Рис. 19б). Эти две страны являются основными источники атмосферного загрязнителями бенз(а)пиреном Черного и Азовского морей. Российские источники представлены Южным федеральным округом (14%) и Республикой Крым (2%). Источники выбросов бенз(а)пирена Казахстана формируют около

половины выпадений на Каспийское море (Рис.19в). Вторым по значимости зарубежным источником является Азербайджан (6%). Российские источники представлены в основном Северо-Кавказским (20%) и Южным (6%) федеральными округами.

Рисунок 19. *Вклады российских и зарубежных источников в выпадения бенз(а)пирена на Балтийское (а), Черное с Азовским (б) и Каспийское (в) моря в 2021 году.*

5. ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ЭКОСИСТЕМЫ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

5.1. Превышение ПДК бенз(а)пирена в регионах РФ

Информация о долгосрочных изменениях концентраций в воздухе и превышений ПДК может быть важна для анализа эффективности мер по снижению антропогенных выбросов бенз(а)пирена в атмосферу и воздействия на здоровье населения.

Данные модельных расчетов (Рис. 4) для 2021 года, полученные на основе информации о выбросах программы ЕМЕП, показывают превышение ПДК для среднегодовых концентраций бенз(а)пирена в Московской, Ленинградской, Ростовской областях, а также в отдельных городах (Москва, Санкт-Петербург, Ростов на Дону, Липецк, Омск, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск, Новокузнецк). Расчеты на основе национальных данных России о выбросах бенз(а)пирена (Рис. 5) демонстрируют более высокие уровни среднегодовых концентраций и более значительные превышения ПДК для бенз(а)пирена.

Уровни концентраций бенз(а)пирена в воздухе характеризуются резкими сезонными вариациями, что обуславливается как сезонной неравномерностью выбросов в атмосферу, так и изменчивостью метеорологических условий в течение года. Анализ внутригодовых изменений расчетных среднесуточных концентраций бен(а)пирена в некоторых городах проекта «Чистый воздух» в 2021 году показывает, что большая часть превышений ПДК происходит в холодный период (Рис. 20).

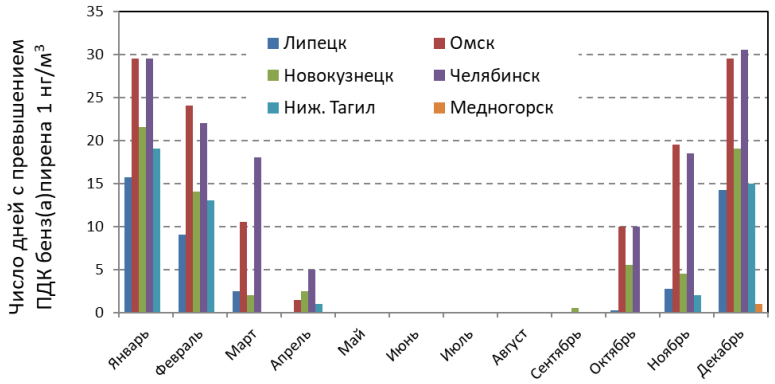


Рисунок 20. *Среднее число превышений ПДК бенз(а)пирена 1 нг/м³ в 2021 году в некоторых городах проекта «Чистый воздух» по данным модельных расчетов.*

В тоже время, следует отметить высокий уровень неопределенностей в данных о выбросах бенз(а)пирена в России, что приводит к несоответствию пространственного распределения концентраций бенз(а)пирена по данным моделирования и мониторинга, а также к возможному занижению наблюдаемых концентраций бенз(а)пирена и количества превышений ПДК в расчетах для ряда регионов России.

5.2. Выпадения на различные типы подстилающей поверхности

Модель GLEMOS позволяет оценить потоки выпадений тяжёлых металлов на различные виды подстилающей поверхности. Информация о динамике и интенсивности потоков выпадений может быть использована для анализа накопления и воздействия тяжелых металлов на различные природные экосистемы, а также на здоровье людей. Интенсивность потоков выпадений, определяется рядом факторов, таких как содержание загрязнителей в атмосфере, свойства подстилающей поверхности (неровности подстилающей поверхности, покрытие высокой или низкой растительностью (леса, луга, земли сельскохозяйственного назначения) и метеорологическими параметрами (скорость ветра, количество атмосферных осадков).

Данные по пространственному распределению типов подстилающей поверхности основаны на результатах спутниковых наблюдений MODIS (MCD12Q1, версия 6). Этот глобальный набор имеет исходное пространственное разрешение 500 x 500 м и включает 17 типов подстилающей поверхности. Начиная с 2001 года, данные по подстилающей поверхности обновляются на ежегодной основе. Более подробное описание этих данных представлено на сайте https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/, а также в документе [*Friedli et al.*, 2019]. Модель GLEMOS рассчитывает выпадения на все 17 типов поверхности, но для более наглядной демонстрации результатов часть типов поверхности была сгруппирована. В частности, 5 типов лесов (лиственные вечнозелёные, хвойные вечнозелёные, лиственные листопадные, хвойные листопадные, смешанные) были объединены в одну группу «леса». В группу «кустарники и редколесье» были объединены типы «открытые кустарники», «закрытые кустарники», «саванны» и «лесистые саванны». Под саваннами в данных MODIS подразумеваются природные территории, где высота деревьев превышают 2, и ими покрыто от 10% до 60% площади. Под типом «смешанные земли» подразумеваются территории, сочетающие в себе как участи сельскохозяйственных земель, так и природные земли.

Средние величины потоков выпадений на отдельные типы подстилающей поверхности в федеральных округах России и Республике Крым показаны на Рис. 21. Как правило, наиболее высокие потоки выпадений отмечаются для лесов и городской застройки. Высокие потоки выпадений на леса объясняются большей удельной поверхностью за счёт листвы или хвои, по сравнению с другими видами поверхности. К тому же для лесов характерен более высокий коэффициент шероховатости, что также приводит к более высокой скорости сухого осаждения. Высокие выпадения для городской застройки объяснятся в первую очередь расположением источников. Антропогенными источниками выбросов ртути являются различные промышленные объекты, которые сами по себе уже являются разновидностью застройки. Сравнительно высокие потоки выпадений на земли сельскохозяйственного назначения в Центральном и Дальневосточном округах объясняются близостью к источникам выбросов. Повышенные потоки выпадений ртути на ледники и земли, лишённые растительности в Северо-Кавказском федеральном округе связаны с повышенным количеством атмосферных осадков, вызванных орографическими эффектами.

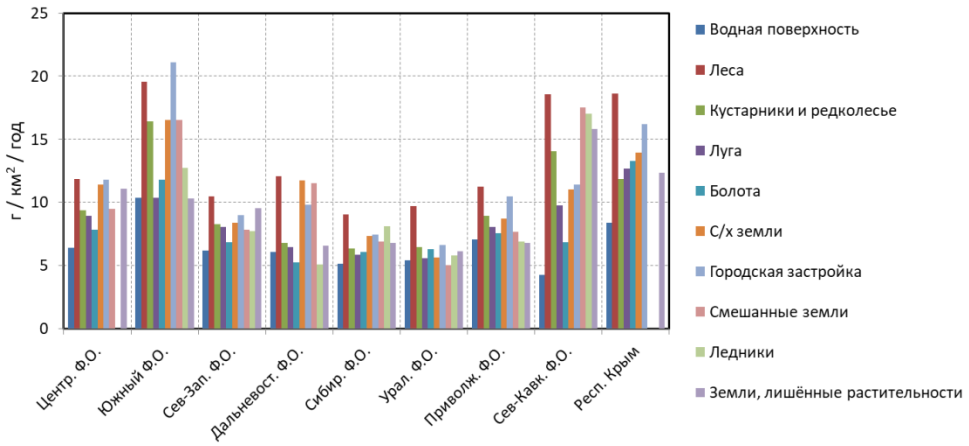


Рисунок 21. *Средние потоки выпадений ртути на различные виды подстилающей поверхности.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете представлены результаты предварительных расчетов уровней загрязнения ртути и бенз(а)пирена в России, выполненных с помощью модели GLEMOS на основе официальных данных о выбросах программы ЕМЕП, экспертных оценок и национальных данных России. Приведены оценки трансграничного переноса, концентраций в атмосфере и выпадений на подстилающую поверхность для 2021 года.

Диапазон изменений среднегодовых концентраций ртути в 2021 году на территории России в приземном слое воздухе составляет 1.3 - 2 нг/м^3. Сравнительно высокие концентрации ртути получены для ряда территорий, что обусловлено либо влиянием значительных антропогенных источников (например, Кольский полуостров, Забайкальский край, Магаданская область), либо трансграничного переноса (например, Южный федеральный округ, Приморский край). Наиболее высокие потоки выпадений (>20 г/км^2 в год) отмечаются для Южного, запада Северо-Кавказского и юга Центрального федеральных округов. Результаты модели в основном соответствуют данным измерений концентраций ртути в атмосфере. Вместе с тем, для

некоторых станций отмечены значительные расхождения между измеренными и расчетными величинами. Также следует отметить ограниченность данных измерений ртути на территории России.

Среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в приземном слое воздухе на территории России по результатам расчетов для 2021 года меняются в значительном диапазоне от 0.001 нг/м^3 до 2 нг/м^3 и более. Наиболее высокие концентрации бенз(а)пирена получены для Московской, Ленинградской, Ростовской областей, а также для отдельных городов (Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Липецк, Омск, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск, Новокузнецк). Среднегодовые концентрации бенз(а)пирена в расчетах по национальным данным России и данным программы ЕМЕП характеризуются заметными различиями. Сравнение результатов показало более высокие уровни концентраций и выпадений для Республики Крым и для Северо-Кавказского, Центрального, Южного, Сибирского и Приволжского федеральных округов, и более низкие уровни для Уральского и Северо-Западного федеральных округов в случае применения национальных данных.

Сравнение результатов расчетов с данными мониторинга показывает заметные различия в пространственном распределении концентраций бенз(а)пирена на территории России. Моделирование показывает высокие уровни загрязнения в Центральном, Южном и Северо-Кавказском федеральном округах и более низкие в Уральском и Сибирском федеральных округах, что не соответствует измерениям. Причины несоответствия могут быть связаны с неопределенностями оценок выбросов от источников в субъектах России, а также их пространственного распределения. Таким образом, для повышения надежности результатов моделирования требуется дальнейшее уточнение информации о выбросах бенз(а)пирена в России.

Оценки долговременных изменений годовых потоков выпадений ртути на территории федеральных округов России с 1990 по 2021 год показывают снижение уровней загрязнения. Наибольшее относительное снижение выпадений (около 35%) получено для Республики Крым, наименьшее снижение получено для Северо-Западного федерального округа. В отличие от ртути, расчеты долговременных изменений концентраций бенз(а)пирена на территории России показывают сравнительно небольшие изменения. Вместе с тем, данные регулярного мониторинга бенз(а)пирена в городах показывают в среднем снижение концентраций на 14-16%. Для повышения достоверности оценок динамики уровней загрязнения бенз(а)пиреном в России необходима подготовка национальных данных по выбросам за длительный период времени.

Оценки трансграничного переноса ртути на территории России показывают преобладающий вклад зарубежных источников в выпадения ртути (от 45% до 80%). Среди зарубежных стран наибольший вклад в выпадения ртути вносят источники выбросов Китая (от 7% до 40%). Доля выпадений от собственных источников России сравнительно невелика (от 0.5% до 14%). Расчеты трансграничного переноса бенз(а)пирена на территории России показывают, что уровни загрязнения в федеральных округах в основном формируются собственными источниками выбросов. Так, например, вклады в среднегодовые концентрации собственных источников в большинстве городов, входящих в федеральный проект «Чистый воздух»,

превышают 70%. Вклад зарубежных источников в концентрации бенз(а)пирена сравнительно невелик.

На основе моделирования дополнительно сделаны оценки вкладов различных источников в загрязнение Арктики и окраинных морей. Вклад зарубежных источников в выпадения ртути на Арктику преобладает во всех арктических регионах России и меняется от примерно 50% (Магаданская область) до 67% (Ямало-Ненецкий автономный округ). Доля российских источников меняется от 11% (Красноярский край) до 34% (Магаданская и Архангельская области). Расчеты трансграничного переноса бенз(а)пирена показывают, что вклад источников России в выпадения на Балтийское, Черное с Азовским и Каспийское моря составляет 9%, 16% и 26%, соответственно.

Данные модельных расчетов для 2021 года показывают превышение ПДК для среднегодовых концентраций бенз(а)пирена в Московской, Ленинградской, Ростовской областях, а также в отдельных городах (Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Липецк, Омск, Нижний Тагил, Екатеринбург, Челябинск, Новокузнецк). Уровни концентраций бенз(а)пирена в воздухе характеризуются резкими сезонными вариациями, что обуславливается как сезонной неравномерностью выбросов в атмосферу, так и изменчивостью метеорологических условий в течение года. Наибольшее количество превышений отмечается для холодного периода года. Оценки выпадений ртути на отдельные типы подстилающей поверхности в федеральных округах России и Республике Крым показывают наиболее высокие величины потоков для лесов и городской застройки.

Представленные результаты могут быть полезны для анализа уровней загрязнения в России и их временной динамики, преобладающих источников, а также для оценки воздействия на экосистемы и здоровье населения. Дальнейшая разработка и уточнение применяемых модельных подходов, а также используемых данных по выбросам и данных мониторинга позволят повысить достоверность оценок загрязнения территории России и способствовать формированию мер по его сокращению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

AMAP/UNEP [2019] Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland. viii + 426 pp including E-Annexes.

Colette A., Aas W., Banin L., Braban C.F., Ferm M., González Ortiz A., Ilyin I., Mar K., Pandol fi M., Putaud J. -P., Shatalov V., Solberg S., Spindler G., Tarasova O., Vana M., Adani M., Almodovar P., Berton E., Bessagnet B., Bohlin-Nizzetto P., Boruvkova J., Breivik K., Briganti G., Cappelletti A., Cuvelier K., Derwent R., D'Isidoro M., Fagerli H., Funk C., Garcia Vivanco M., González Ortiz A., Haeuber R., Hueglin C., Jenkins S., Kerr J., de Leeuw F., Lynch J., Manders A., Mircea M., Pay M.T., Pri tula D., Putaud J.-P., Querol X., RaffortV., Reiss I ., Roustan Y., Sauvage S., Scavo K., Simpson D., Smith R.I., Tang Y.S., Theobald M., Tørseth K., Tsyro S., van Pul A., Vidic S., Wallasch M., Wind P. [2016]. Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012 Joint Report of the EMEP Task Force on Measurements and Modelling (TFMM), Chemical Co-ordinating Centre (CCC), Meteorological Synthesizing Centre -East (MSC-E), Meteorological Synthesizing Centre -West (MSC-W) EMEP: CCC-Report 1/2016. 105 p. Available at https ://projects.nilu.no/ccc/reports.

Friedli H.R., Arellano A.F., Cinnirella S. and Pirrone N. [2009] Initial Estimates of Mercury Emissions to the Atmosphere from Global Biomass Burning. Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 3507–3513.

Gauss M., A. Gusev, W. Aas, V. Shatalov, I. Ilyin, O. Rozovskaya, H. Klein, A. Nyiri, N. Batrakova, N. Vulyh [2022] Atmospheric Supply of Nitrogen, Cadmium, B(a)P, HBCDD, PCNs and PeCB to the Baltic Sea in 2020 EMEP Centres Joint Report for HELCOM. MSC-W Technical Report 1/2022.

GEOS-CHEM [2020] The International GEOS-Chem User Community: geoschem/geos-chem: GEOS-Chem 12.8.2 (Version 12.8.2), Zenodo, https://doi.org/10.5281/zenodo.3860693, 2020.

Gusev A., N.Batrakova, V. Shatalov [2021] Assessment of PAH pollution levels, key sources and trends: Contribution to analysis of the effectiveness of the Protocol on POPs. MSC-E Technical Report on PAHs 2/2021.

Ilyin I, Travnikov O. and Rozovskaya O. [2023b] Assessment of Pb, Cd and Hg atmospheric pollution of OSPAR maritime area in 2020. EMEP/MSC-E Technical Report 1/2023. 47 p.

Ilyin I., Degorska A., Pandolfi M. and Vana M. [2018] Detailed assessment of heavy metal and POP pollution in the EMEP countries, PART II: Poland. Joint MSC-E & IER-NRI & EGAR & CHMI Report Technical Report 5/2018.

Ilyin I., N.Batrakova, A.Gusev, M.Kleimenov, O.Rozovskaya, V.Shatalov, I.Strizhkina, O.Travnikov, K.Breivik, P.B.Nizzetto, K.A.Pfaffuffer, W.Aas, S.Poupa, R.Wankmueller, B.Ullrich, M. Bank, Q. T. Ho, M. G. Vivanco, M. R. Theobald, J. L. Garrido, V. Gil, F. Couvidat, A. Collette, M. Mircea, M. Adani4, I. D'Elia, R. D. Kouznetsov, E. V. Kadantsev [2022] Assessment of heavy metal and POP pollution on global, regional and national scales. EMEP Status report 2/2022. July 2022.

Ilyin I., N.Batrakova, A.Gusev, O.Rozovskaya, V.Shatalov, I.Strizhkina, O.Travnikov [2023a] Heavy metals and POPs: Pollution assessment of toxic substances on regional and global scales. EMEP Status report 2/2023. August 2023.

Ilyin I., O. Travnikov, G. Schütze, S. Feigenspan and K. Uhse [2020] Country-scale assessment of heavy metal pollution: A case study for Germany. Joint Report of MSC-E and German Environment Agency. MSC-E Technical Report 1/2020.

Maas R. and Grennfelt P. (eds) [2016] Towards Cleaner Air. Scientific Assessment Report 2016. EMEP Steering Body and Working Group on Effects of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, Oslo. xx+50pp.

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X-Y., Wang W. and Powers J.G. [2008] A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN–475+STR NCAR technical note.

Steffen, A., Douglas, T., Amyot, M., Ariya, P., Aspmo, K., Berg, T., Bottenheim, J., Brooks, S., Cobbett, F., Dastoor, A., Dommergue, A., Ebinghaus, R., Ferrari, C., Gardfeldt, K., Goodsite, M. E., Lean, D., Poulain, A. J., Scherz, C., Skov, H., Sommar, J., and Temme, C. [2008] A synthesis of atmospheric mercury depletion event chemistry in the atmosphere and snow, *Atmos. Chem. Phys*., 8, 1445–1482, https://doi.org/10.5194/acp-8-1445-2008, 2008..

Stockholm Convention [2017] Second global monitoring report. Global Monitoring Plan for Persistent Organic Pollutants Under the Stockholm Convention article 16 on effectiveness evaluation. UNEP/POPS/COP.8/INF/38. January 2017.

Travnikov O., Kleimenov M., Gusev A. [2021] Co-operative activities on Hg and POP pollution assessment within TF HTAP. MSC-E Technical Report 1/2021. July 2021.

Ануфриева А.Ф., Загайнова М.С., Ивлева Т.П., Любушкина Т.Н., Смирнова И.В. [2022] Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 г, ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова», Санкт-Петербург, 254 с.

Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А., Пешков Ю.В., Котляков М.Г., Красильникова Т.А. [2021] Обзор фонового загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет, Москва, 2021, 202 с.

Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А., Пешков Ю.В., Котляков М.Г., Красильникова Т.А. [2022] Обзор фонового загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, Москва, 2022, 221 с.