Загрязнение ртутью: тематическое исследование для Норвегии

Ртуть известна как токсичное загрязняющее вещество, способное переноситься на большие расстояния и загрязнять отдаленные районы. Длительное время пребывания в атмосфере и способность циклически перемещаться между природными средами определяют глобальный характер распространения Hg и значительные уровни загрязнения в регионах, удаленных от источников выбросов (полярные районы, открытый океан и т. д.). Недавние исследования загрязнения Арктики ртутью [AMAP, 2021; Dastoor et al., 2022] показали, что более 98 % ртутного загрязнения в Арктическом регионе приносится извне посредством атмосферного и океанического переноса. Это приводит к загрязнению наземных и водных экосистем высоких широт и северных стран.

Подробное исследование ртутного загрязнения в масштабах страны было проведено для Норвегии в рамках отчета Norwegian Mercury Assessment 2022 [NMA, 2022]. Эта работа продолжает серию исследований в масштабе страны, проведенных МСЦ-В за последнее десятилетие и сосредоточенных на анализе загрязнения тяжелыми металлами и СОЗ в отдельных странах ЕМЕП (Хорватия, Чешская Республика, Нидерланды, Беларусь, Польша, Германия, Великобритании, Испании и Франции). Эти исследования проводятся в тесном сотрудничестве с национальными экспертами и включают подробные национальные измерения и данные о выбросах.

В текущем проекте MSC-E предоставил данные моделирования и участвовал в анализе пространственных закономерностей уровней ртути в Норвегии и прилегающих морях, долгосрочных тенденций выбросов ртути, концентраций и потоков выпадений в стране, а также уровней и трендов в биоте. Основные результаты исследования обсуждается ниже.

Использованные данные

Для анализа уровней и тенденций ртутного загрязнения атмосферы в Норвегии использовались различные данные моделирования. Пространственные закономерности уровней Hg в стране были проанализированы с использованием моделирования с высоким разрешением в национальном масштабе с помощью модели GLEMOS (v2.2.2) за 2000, 2005, 2010, 2015 и 2019 годы. Анализ тенденций загрязнения за период с 1990 по 2019 гг. был основан на долгосрочном региональном моделировании GLEMOS, выполненном в рамках проекта по оценке загрязнения тяжелыми металлами морских территорий OSPAR [Ilyin et al., 2022]. В дополнение к этому мультимодельное моделирование глобального масштаба, выполненное в рамках AMAP Mercury Assessment 2021 [AMAP, 2021], использовалось для анализа атмосферных нагрузок ртути на водные регионы Северной Атлантики и Арктики.

Результаты моделирования в масштабе страны были сопоставлены с данными мониторинга ЕМЕП для станций, расположенных в Норвегии и других скандинавских странах. Подробная оценка долгосрочного регионального моделирования представлена в [Ilyin et al., 2022]. Описание и оценка глобальных результатов мультимодельной группы приведены в [AMAP, 2021; AMAP/UNEP, 2019]. Пространственное распределение выпадений Hg в Норвегии также сравнивалось с наблюдаемыми концентрациями Hg во мхах по данным, собранным ICP-Vegetation [*Harmens and Norris*, 2008; *Harmens et al.*, 2013; *Frontasyeva et al.*, 2020]. Моделирование выпадений Hg в морских регионах также сравнивалось с измерениями Hg в рыбе [*Bank et al.*, 2021; *Ho et al.*, 2021].

Пространственное распределение

Смоделированные пространственные закономерности концентрации Hg^0 в воздухе и влажных выпадений в скандинавском регионе показаны на рис. 1 и 2 для 2000, 2010 и 2019 годов в сравнении с наблюдаемыми уровнями в доступных точках измерения. Концентрации Hg^0 в воздухе несколько различаются по территории страны: более высокие концентрации в южной части страны, расположенной близко к основным европейским источникам выбросов, и более низкие уровни в северной части (рис. 1). Кроме того, Hg^0 несколько выше над водными областями по сравнению с сухопутными областями из-за более сильного сухого выпадения Hg^0 над сушей за счет поглощения растительностью. Между 2000 г. (1,3-1,6 нг/м^3) и 2019 г. (1,2-1,4 нг/м^3) наблюдается явное снижение концентрации, что подтверждается наблюдениями.

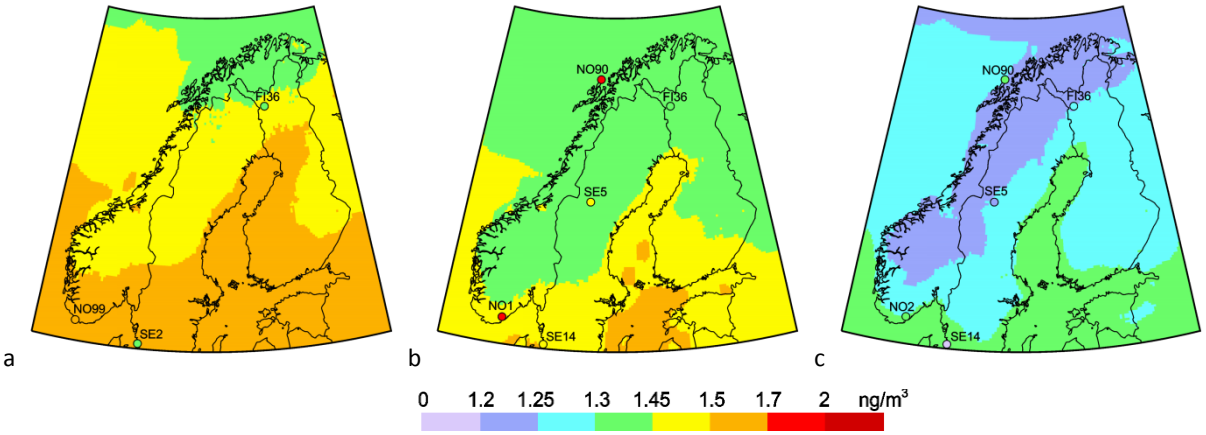

***Рис. 1**. Пространственное распределение смоделированной концентрации Hg^0 в Скандинавии в 2000 (а), 2010 (б) и 2019 гг. (в). Круги показывают измеренные значения в той же цветовой палитре.*

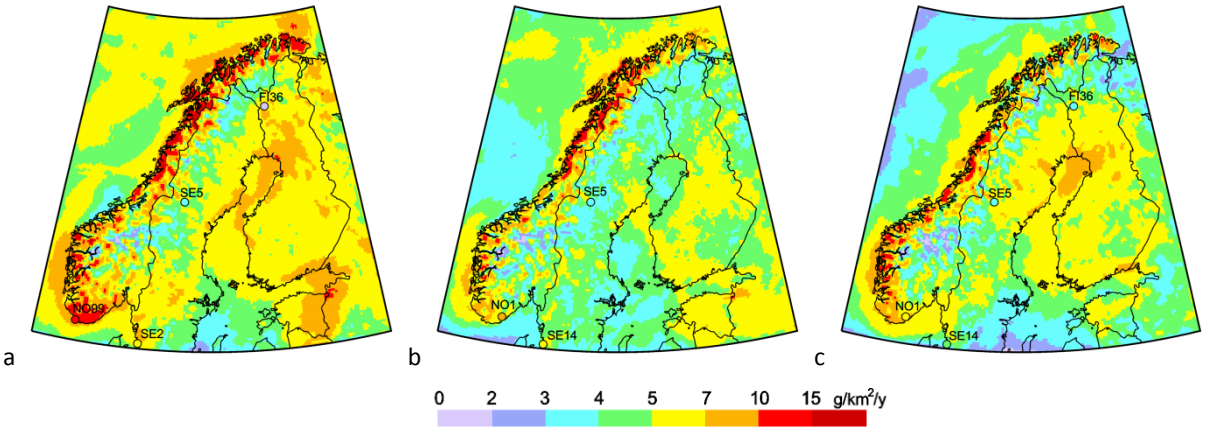

***Рис. 2.** Пространственное распределение смоделированного влажного выпадения ртути в Скандинавии в 2000 (а), 2010 (b) и 2019 гг. (с). Круги показывают измеренные значения в той же цветовой палитре.*

Пространственное распределение влажных выпадений ртути является более сложным и в значительной степени определяется атмосферным химическим составом ртути и характером выпадения. Повышенные уровни влажных выпадений (10-15 г/км^2/год) происходят над норвежским побережьем из-за большого количества годовых осадков и в других районах Скандинавии (5-10 г/км^2/год) из-за эффекта окисления Hg^0 в атмосфере до растворимых форм Hg^{II}, которые легко вымываются осадками. В целом временные изменения влажных выпадений ртути в период с 2000 по 2019 год меньше, чем пространственная изменчивость уровней выпадений по региону.

На рис. 3 показаны карты смоделированного суммарного выпадения ртути в Норвегии в сравнении с измерениями концентрации ртути во мхах в 2000 и 2015 гг. Пространственное распределение выпадений ртути частично соответствует распределению влажного выпадения (рис. 3а и с). Высокие потоки выпадений (более 16 г/км^2/год) наблюдаются в самой южной части страны из-за близости к значительным источникам выбросов в Центральной Европе и над атлантическим побережьем из-за интенсивных осадков и, следовательно, большого вклада влажного вымывания. Стоит отметить, что повышенные уровни выпадения ртути также оцениваются над побережьем в самой северной части страны, что связано с влиянием эпизодов весеннего истощения атмосферной ртути (AMDEs). Поэтому значительного градиента выпадения Hg с севера на юг по территории страны не наблюдается. Самые низкие уровни выпадения были оценены во внутренних областях южной и северной части страны из-за относительно сухого климата.

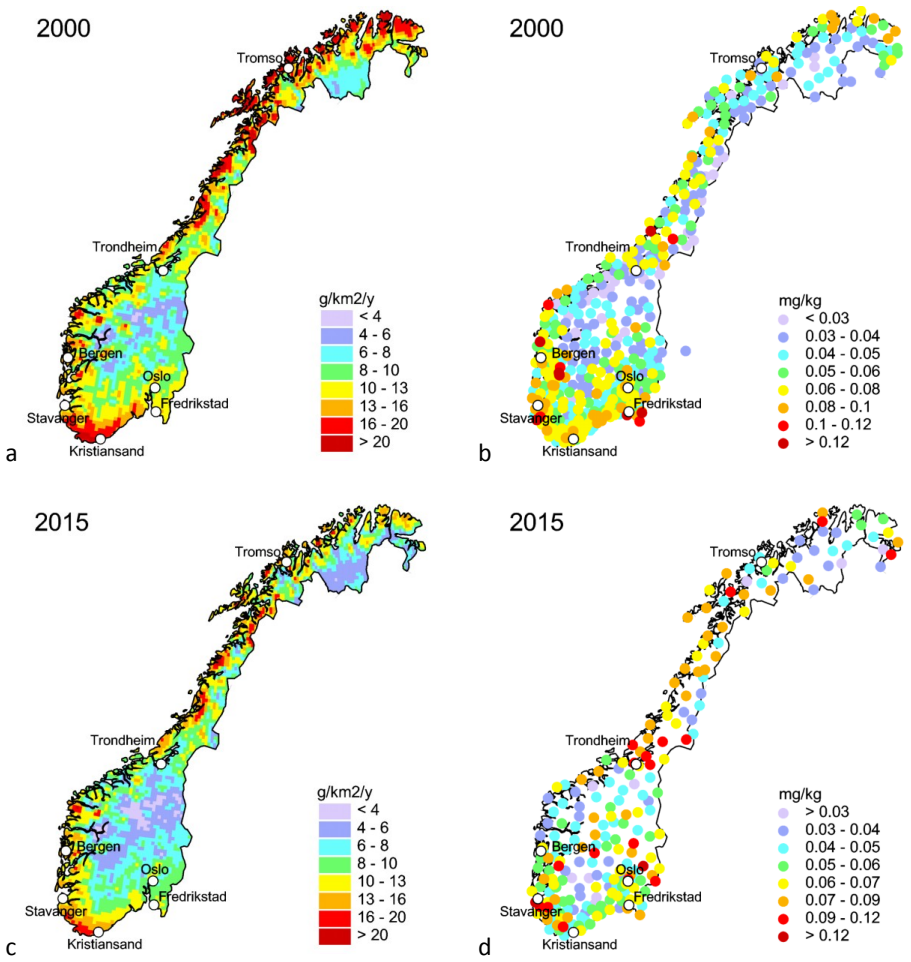

Рис. 4. *Пространственное распределение выпадения Hg по территории Норвегии (а, в) и измеренной концентрации ртути во мхах (б, г) в 2000 и 2015 гг.*

В целом результаты моделирования согласуются с измерениями Hg во мхах (рис. 4b и d) в отношении районов с высокими и низкими атмосферными нагрузками Hg. Повышенные концентрации Hg во мхах также наблюдаются в южной части и вдоль побережья, включая самые северные районы. Более низкие уровни встречаются на внутренних территориях южной и северной частей страны. Существуют также различия между оценками выпадений и концентраций в мхах. Например, высокие уровни ртути во мхах, наблюдавшиеся в некоторых областях на юго-востоке страны в окрестности Осло, не были воспроизведены моделью. Необходим дополнительный анализ для выявления причин расхождений.

Потребление рыбы и других морепродуктов является одним из основных путей воздействия ртути на человека. Поэтому пространственная изменчивость выпадений Hg на акватории Северо-Восточной Атлантики и Арктики сравнивалась с концентрациями Hg в морской рыбе, измеренными в этих регионах (рис. 5). Уровни ртути в рыбе, в целом, коррелируют с атмосферными нагрузками ртути. И модель, и наблюдения демонстрируют более высокие уровни Hg в прибрежных водах Северного и Норвежского морей, пролива Скагеррак и открытых водах Северной Атлантики. Самые низкие уровни выпадений и концентраций Hg в рыбе наблюдаются в Баренцевом море. Следует отметить, что помимо атмосферных выпадений уровни Hg в рыбе зависят от множества других факторов, что усложняет выявление взаимосвязи.

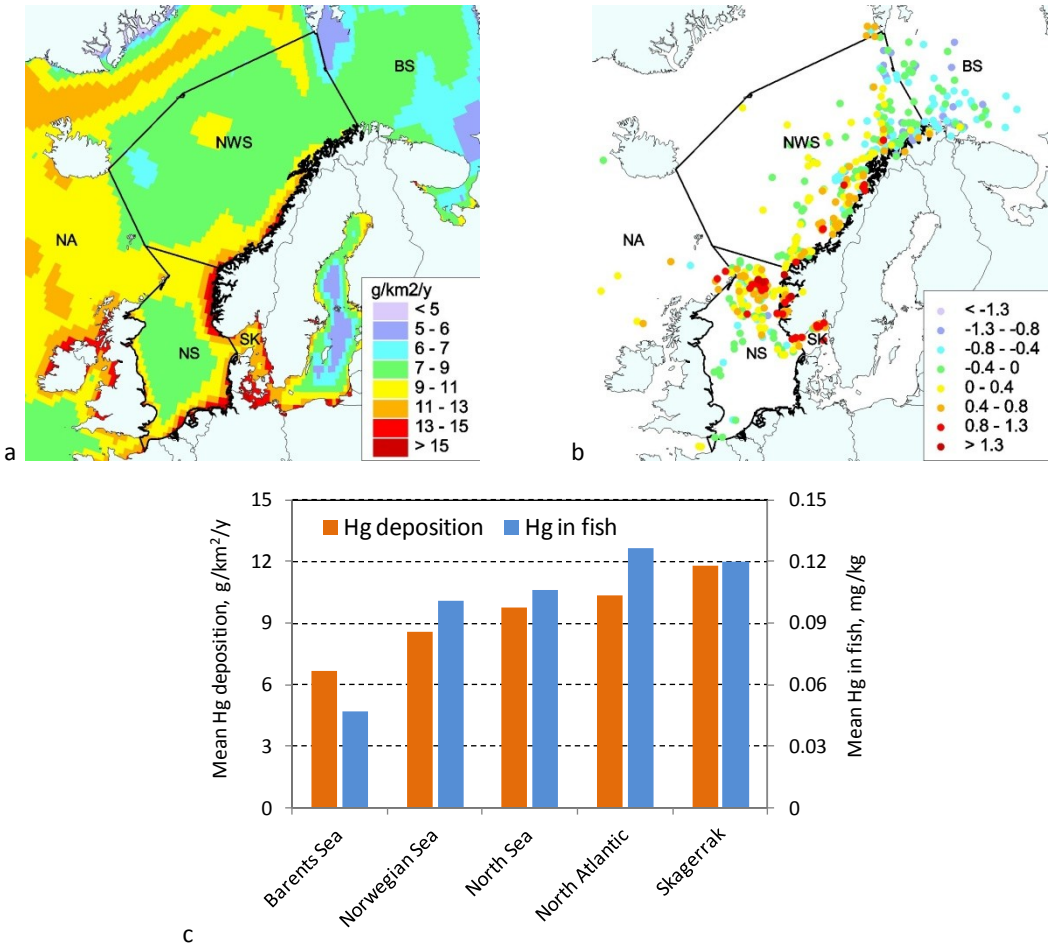

Рис. 5. *Пространственное распределение смоделированных выпадений Hg на акватории Северо-Восточной Атлантики и Арктики, прилегающими к побережью Норвегии в 2015 г. (а) и измеренные концентрации Hg в рыбе в 2006-2019 гг. (масштабированное значение логарифмически преобразованного уровня для всех видов рыб (Ho et al., 2021) (б); (с) – сравнение средних уровней выпадений с концентрациями Hg в рыбе в различных регионах.*

Временные изменения

Долгосрочные изменения уровней ртути в Норвегии изучались с использованием различных данных, включая модельные оценки, измерения в атмосфере, мхах и морской рыбе. Как результаты моделирования, так и измерения ртути в атмосфере показывают относительно небольшое снижение (17%) концентрации Hg^0 в воздухе (рис. 6a) за последние 30 лет из-за значительного вклада глобальных выбросов, которые менялись медленно. Несколько большее снижение за этот период (30%) продемонстрировано влажным выпадением ртути, измеренным и смоделированным на станциях мониторинга Биркенес/Листа, расположенных в южной части страны (рис. 6b). На влажное

выпадение ртути сильнее влияют региональные выбросы в Европе, которые значительно сократились за этот период.

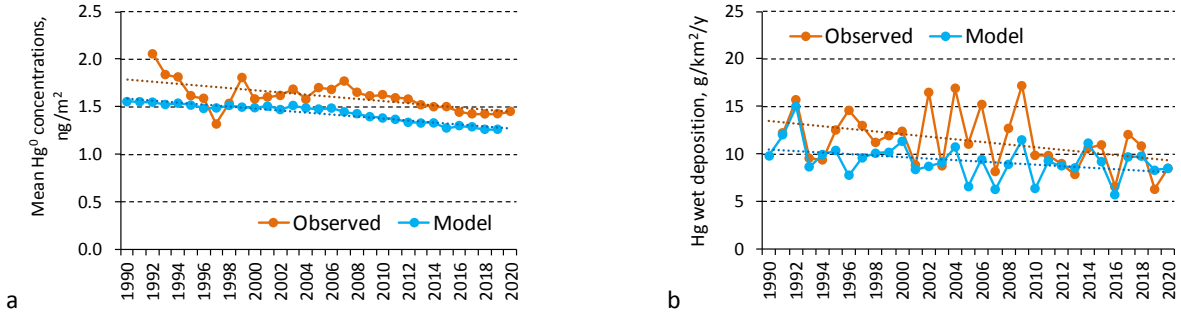

Рис.6. *Долгосрочные тренды измеренных (в среднем по станциям Birkenes/Lista, Andoya и Zeppelin) и смоделированных (в среднем по Норвегии) концентрации Hg^0 в воздухе (a) и влажных выпадений на Birkenes/Lista (b).*

Средние суммарные (влажные+сухие) выпадения Hg в стране претерпевает несколько меньшее уменьшение за 30-летний период (25%) из-за влияния медленно меняющихся уровней выпадения в северной части страны (рис. 7a). Об этом также свидетельствуют незначительные изменения концентрации Hg во мхах в среднем по территории страны. Аналогичная скорость снижения была оценена для выпадения Hg в прибрежную зону Норвежского моря за последние 10 лет (10%) (рис. 7b). Напротив, концентрация Hg в рыбе (черный палтус), выловленной в этом регионе, за тот же период снизилась значительнее (60%). Эта разница показывает важность других факторов, которые могут дополнительно влиять на уровни ртути в рыбе, включая миграцию рыб, сложность пищевой цепочки, индивидуальный рацион и т. д.

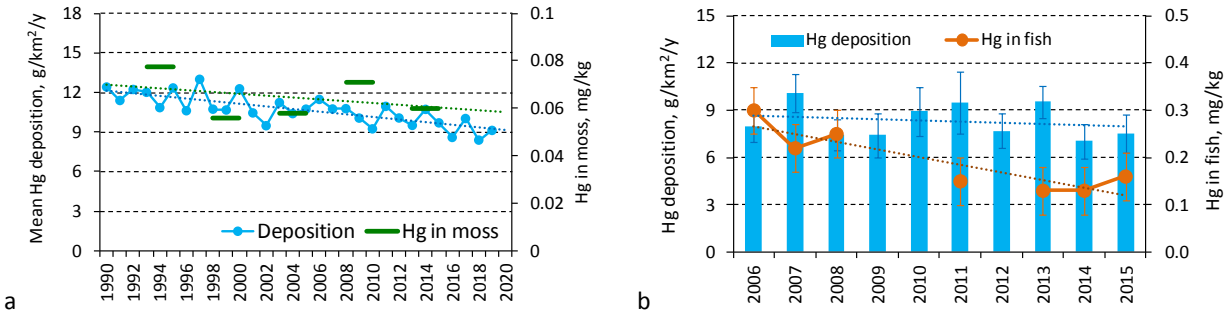

Рис. 7. *Долгосрочные тренды средних смоделированных выпадений Hg и измеренных концентраций Hg во мхах в Норвегии (a) и выпадений Hg над Норвежским морем в сравнении с концентрациями Hg в рыбе (черный палтус, Bank et al., 2021).*

Проведенное исследование в масштабе страны предоставляет дополнительные сведения о загрязнении ртутью в Норвегии и может быть полезным для оценки эффективности национальных и международных мер по сокращению загрязнения. Кроме того, дальнейший анализ отклонений между результатами моделирования и наблюдениями может способствовать дальнейшему совершенствованию подходов к моделированию.