

УДК 551.510.42

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ПОВЫШЕННЫХ СОДЕРЖАНИЙ ДИОКСИДА СЕРЫ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ФИНЛЯДИИ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2023 г. Е. Д. Дрюкова^а, Г. М. Неробелов^{б, в, *}, М. С. Седеева^б, А. В. Киселев^б,
А. Г. Махура^д, В. И. Горный^б

^аРоссийский государственный гидрометеорологический университет,
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, 195196 Россия

^бСПб ФИЦ РАН – Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,
ул. Корпусная, 18, Санкт-Петербург, 187110 Россия

^вСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^дУниверситет Хельсинки, Институт исследования атмосферных и наземных систем,
ул. Gustaf Hallstrominkatu, 2a, Хельсинки, FI-00560 Финляндия

*e-mail: akulishe95@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 14.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Статья посвящена исследованию причин повышенной приземной концентрации токсичного газа диоксида серы (SO₂) на севере Финляндии. Исследование выполнено для июня 2011 г., когда по данным наблюдений на финской измерительной станции Inari Raja-Jooseppi зафиксированы случаи повышенного содержания SO₂ у поверхности Земли при направлениях приземного ветра с территории Кольского полуострова. С помощью данных спутникового зондирования SO₂ прибором OMI, численной модели прогноза погоды и состава атмосферы Enviro-HIRLAM и модели дисперсии частиц HYSPLIT в работе проверяется гипотеза о природном факторе повышения приземного содержания газа в результате извержения вулкана Гримсвётн в Исландии. Полученные результаты указывают на то, что причиной повышенного содержания SO₂ в приземном слое на севере Финляндии могут быть не только местные техногенные источники, но и удаленный перенос продуктов вулканических извержений. Для дальнейшей верификации этой гипотезы требуется большой набор статистики на севере Финляндии в периоды близкие к вулканической активности в Исландии.

Ключевые слова: северная Финляндия, приземная концентрация SO₂, вулканическое извержение, Enviro-HIRLAM, HYSPLIT, спутниковые измерения

DOI: 10.31857/S0002351523040041, **EDN:** YMZGRK

1. ВВЕДЕНИЕ

Диоксид серы (SO₂) – высокотоксичный газ, вызывающий раздражение слизистых оболочек (гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17, <https://docs.cntd.ru/document/556185926>). В концентрациях, превышающих предельно допустимые, этот токсикант приводит к заболеваниям органов дыхания [Акимов, 2017; Шлегель и др., 2016]. Кроме того, повышенное содержание диоксида серы в слое нижней тропосферы негативно сказывается на состоянии растительности. Исследования показывают, что при длительном воздействии высоких концентраций, у растений происходит снижение интенсивности фотосинтеза на 90% [Спахова и др., 1978].

Основными антропогенными источниками SO₂ являются тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе, автомобильный транспорт, а также предприятия металлургии. Поэтому наиболее высокие концентрации SO₂ в приземном слое атмосферы, превышающие предельно-допустимую концентрацию (ПДК) наблюдаются в воздухе крупных промышленных агломераций, особенно в тех, в которых расположены предприятия цветной металлургии (гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17, <https://docs.cntd.ru/document/556185926>). Существуют и природные источники SO₂: вулканы, лесные пожары, деструкция органики в почве и воде и др. [Seinfeld et al., 1998].

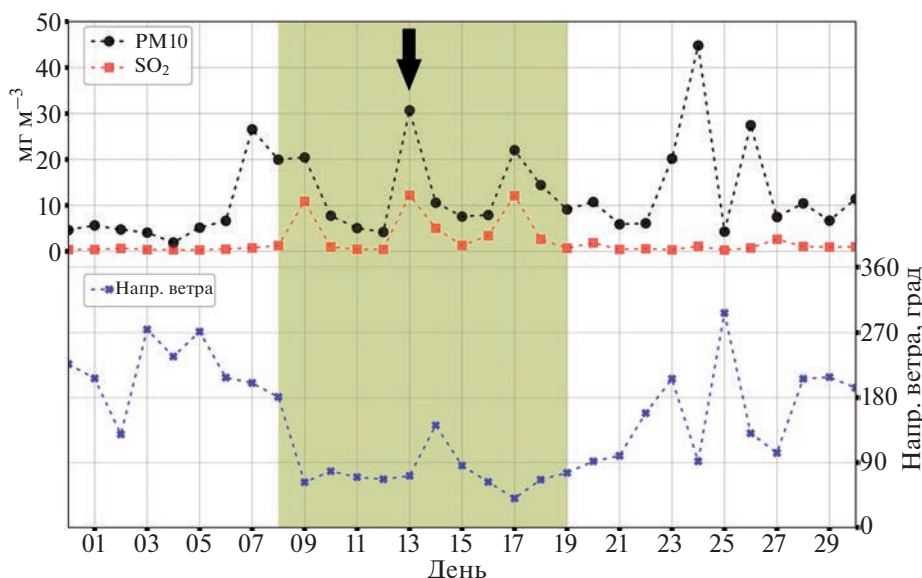


Рис. 1. Временной ряд среднесуточных приземных концентраций PM10 и SO₂ и направлений ветра по данным со станции Inari Raja-Jooseppi (ID станции 102009, 68.48 с.ш. и 28.30 в.д.) за июнь 2011 г. Прямоугольной областью выделен исследуемый интервал времени с повышенными приземными концентрациями загрязнителей и соответствующих направлений ветра с территории Кольского полуострова. Стрелкой показан исследуемый пример относительно высоких значений содержания PM10 и SO₂ в приземном воздухе.

Одним из промышленных регионов России является Мурманская область, занимающая территорию Кольского полуострова. Основой экономики области являются предприятия освоения недр (горно-металлургические компании или ГМК) и энергетика. При неблагоприятных метеорологических условиях вблизи промышленных предприятий Мурманской области наблюдаются превышения максимальной разовой ПДК SO₂ в 3–5 раз (по данным ФГБУ Мурманского УГМС, <http://www.kolgimet.ru/monitoring-zagriznenija-okruzhajushchei-sredy/centr-monitoringa-zagriznenija-okruzhajushchei-sredy/osobennosti-zagriznenija/>).

В связи с трансграничным загрязнением воздуха в северной части Финляндии и на северо-востоке Норвегии с середины 80-х годов были приняты меры по снижению эмиссии SO₂ в атмосферу предприятиями цветной металлургии Мурманской области. В результате к 2008 г. выбросы двуокиси серы горно-металлургического комбината “Печенганикель” стали на 75% ниже, чем в 80-е годы [Каролин, 2008]. Снижение объема выбросов предприятиями Мурманской области отмечено на территории Финляндии [Kyrö et al., 2014].

Анализ результатов мониторинга качества воздуха на севере Финляндии за июнь 2011 г. (рис. 1, данные финской измерительной станции Inari Raja-Jooseppi, 68.48° с.ш. 28.30° в.д., <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/>) указывает на наличие случаев превышения максимальной разовой ПДК SO₂ ВМО (~0.5 мг м⁻³) [World Health Organization, 2006]. В особенности необходимо отме-

тить 13-е июня 2011 г. (на рис. 1), когда наблюдалось повышение приземного содержания двух загрязнителей — диоксида серы и аэрозолей PM10 (показано стрелкой на рис. 1).

Одним из объяснений такого повышения содержания SO₂ являются эмиссии с промышленных предприятий Кольского полуострова. Ряд независимых исследований продолжает отмечать загрязнение окружающей среды диоксидом серы и аэрозолями от промышленных источников Кольского полуострова и в недавние годы. Например, согласно исследованию [Sipilä et al., 2021] антропогенные эмиссии с территории полуострова в 2019–2020 гг. приводили к высоким значениям приземной концентрации газа (до ~0.079 мг м⁻³) на финской измерительной станции Värriö вблизи Российско-Финской границы. Кроме эмиссий предприятий Кольского полуострова, повышение приземной концентрации SO₂ в Финляндии в июне 2011 г. могло быть вызвано атмосферным переносом на расстояние ~2100 км выбросов с ГМК г. Норильска — крупнейшего техногенного источника диоксида серы в атмосфере [Hirdman et al., 2010; Khokhar et al., 2005]. По данным исследования [Fioletov et al., 2016], средние ежегодные выбросы SO₂ данной ГМК в период 2005–2014 гг. составляют 2.05 Мт/год, что приблизительно соответствует половине всех эмиссий с территории России и превышает выбросы SO₂ со всей территории Канады. Кроме антропогенной природы загрязнения воздуха диоксидом серы, в литературе высказывается предположение о возможном

переносе в сторону Кольского полуострова этого газа, поступающего в атмосферу при извержениях вулканов Камчатки, Исландии и Алеутских островов [Hirdman et al., 2010; Khokhar et al., 2005]. В связи с неоднозначностью определения источников токсиканта встает вопрос о природе наблюдающегося повышения приземной концентрации SO_2 в июне 2011 г. — антропогенная или естественная?

В последние годы для объяснения причин повышенного содержания токсичных газов у поверхности Земли применяются математические модели, которые описывают перенос примесей в атмосфере [Seinfeld, et al., 1998; Sportisse, 2009]. Причем используются как относительно простые дисперсионные модели с предзаданными метеорологическими полями, так и более сложные трехмерные модели прогноза погоды и состава атмосферы, в основе которых лежит система уравнений гидро- и термодинамики. В работе [Fuentes et al., 2022] авторы используют модель дисперсии частиц в атмосфере для оценки влияния эмиссий морского порта в городе Веракрус, Мексика на содержание SO_2 в воздухе прилегающей территории. Благодаря моделированию переноса SO_2 от источника авторам удалось идентифицировать случаи низкого качества воздуха, обусловленные эмиссиями морского порта. В исследовании [Paez et al., 2021] дисперсионная модель применяется для анализа распространения SO_2 и иных загрязнителей от вулкана Копаяуэ в Южной Америке в 2016 г. Результаты моделирования шлейфа от извержения вулкана схожи с данными спутниковых измерений SO_2 с точки зрения направления распространения. В работе [Mahura et al., 2018] авторы исследовали влияние выбросов диоксида серы одной из ГМК Кольского полуострова на загрязнение окружающей среды в северо-западной части России и странах Скандинавии с помощью трехмерной модели дисперсии частиц в атмосфере DERMA. Показано, что кроме северо-западной части России, антропогенное влияние Кольского полуострова на состояние окружающей среды может распространяться до территорий Норвегии и Финляндии. Похожие выводы получены в работе [Неробелов и др., 2020], где для моделирования переноса SO_2 от источников Мурманской области используется трехмерная численная модель прогноза погоды и состава атмосферы Enviro-HIRLAM.

Проведенный анализ загрязнения атмосферного воздуха на севере Скандинавии показал, что несмотря на реализацию в Мурманской области крупной программы снижения выбросов SO_2 системы мониторинга качества воздуха время от времени регистрируют значительные повышения концентраций этого токсиканта в приземном слое атмосферы. Поэтому, целью данного исследования

является применение современных средств информатики для выявления возможных источников загрязнения приземного воздуха диоксидом серы в Мурманской области и, в целом, на севере Финляндии на примере июня 2011 г.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Объект исследования

Объектом исследования выбрана северная часть Финляндии и Мурманская область с акцентом на город Мурманск (Россия), имеющий наибольшую численность населения (около 280 тыс. чел.). Площадь Мурманской области составляет 144.9 тысячи квадратных километров [Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области, 2019]. Рельеф поверхности неоднородный, представлен как горными массивами Хибин, так и равнинами, занятыми болотами и озерами. Климат арктический умеренный, морской с влиянием теплого течения. Средняя температура за период с 2005 по 2011 год — 1.2°C , средняя относительная влажность воздуха составляет 80%. Направление ветра за тот же период преимущественно южное (180°) и юго-юго-западное ($\sim 200^\circ$), среднее значение скорости ветра — 4.3 м/с (gr5.ru).

Исследования выполнены для июня 2011 г. когда по данным наблюдений на финской измерительной станции Inari Raja-Jooseppi (положение отмечено на рис. 2) были зафиксированы случаи повышенного содержания диоксида серы и аэрозольных частиц PM_{10} у поверхности Земли при направлениях приземного ветра с территории Кольского полуострова ($\sim 10^\circ$ – 140° с 9 по 19 июня, рис. 1) (по данным Финского метеорологического института, <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/>). Этому направлению ветра соответствует трансграничный перенос SO_2 как со стороны предприятий Мурманской области, так и Норильска. Нельзя исключать и сверхдальний перенос эксплозий вулканов Камчатки или Алеутских островов.

2.2. Численная модель Enviro-HIRLAM

В работе используются результаты моделирования пространственно-временных вариаций основных метеорологических параметров (температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра) у поверхности Земли в июне 2011 г., выполненного с помощью модели Enviro-HIRLAM (Environment - High Resolution Limited Area Model- модель прогноза погоды и динамики газов и аэрозолей в атмосфере [Baklanov et al., 2017]). Рассмотренные метеорологические параметры важны для пространственно-временной вариации SO_2 в атмосфере. Моделирование выполнено с горизонтальным пространственным разреше-

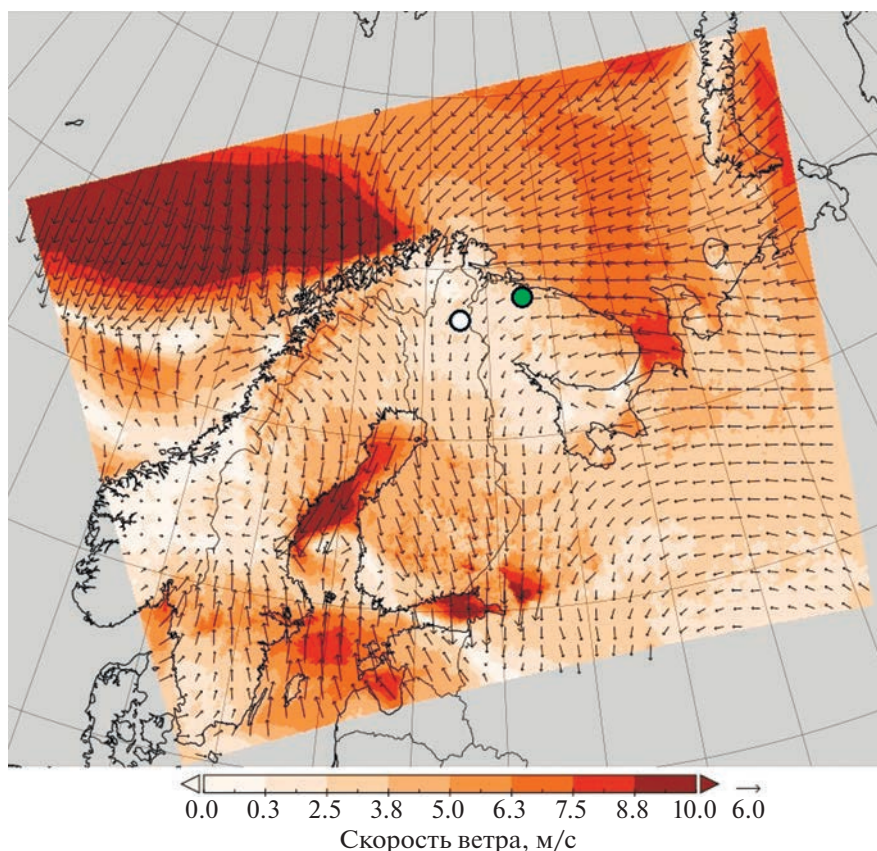


Рис. 2. Карто-схема среднесуточных направления и скорости приземного ветра 13 июня 2011 г. (по данным моделирования Enviro-HIRLAM); белыми и зелеными маркерами выделенные примерные положения финской станции Inari Raja-Jooseppi и г. Мурманска, соответственно.

нием ~ 5 км на 40 гибридных вертикальных уровнях от ~ 30 м над уровнем Земли до высот атмосферного давления менее 10 гПа с временным шагом в 3 ч. В качестве начальных и граничных метеорологических условий используются данные метеорологического реанализа ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) с горизонтальным разрешением 0.15° и временным шагом в 3 ч. Задачей моделирования является выяснение возможности трансграничного переноса техногенных эмиссий SO_2 предприятий Мурманской области к станции Inari Raja-Jooseppi.

Моделирование выполнено на суперкомпьютере CRAY-XC40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, <https://www.ecmwf.int/en/computing/our-facilities/supercomputer>) в рамках научно-исследовательского проекта Enviro-PEEX(Plus) on ECMWF (<https://www.ecmwf.int/en/research/special-projects/spfimahu-2021>). Численный эксперимент проведен за период июня 2011 г. в пределах области, включающей в себя территории севера Финляндии и значительной части севера Европейской России (рис. 2).

Для валидации результатов моделирования приземных метеорологических параметров ис-

пользуются метеорологические измерения, полученные на метеорологической станции г. Мурманска (код 22113) и доступные на сервисе gr5.ru. Обработка, анализ и визуализация данных моделирования и измерений выполнялась при помощи программ Panoply, CDO (Climate Data Operators) и программах на языках Bash и Python.

2.3. Модель дисперсии частиц HYSPLIT

Лагранжевая модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) [Stein et al., 2015] разработана для трехмерного моделирования дисперсии и траекторий движения частиц в атмосфере на различных пространственных масштабах. Модель позволяет рассчитать атмосферный перенос частиц от априорных источников вперед во времени на основе имеющейся информации о состоянии атмосферы за весь период исследования. Кроме того, возможен расчет обратного переноса частиц во времени и пространстве для выявления источников, вызвавших повышение концентрации исследуемого газа. Химические трансформации не учитываются, частицы газа/аэрозолей выходят из атмосферы

Таблица 1. Результаты валидации данных модели Enviro-HIRLAM в Мурманске за июнь 2011 г. по данным метеорологических измерений

Метеорологический параметр	Статистические характеристики		
	$P, \%$	$\Sigma, \%$	K
Температура воздуха	1.1	16.4	0.95
Относительная влажность воздуха	3.8	18.2	0.75
Направление ветра	–10.9	53.7	0.87
Скорость ветра	29.2	31.8	0.75

либо достигнув границы области моделирования, либо благодаря выпадению. В качестве информации о состоянии атмосферы использовались данные GDAS (Global Data Assimilation System), которые представляют собой основные метеорологические параметры (зональная и меридиональная компоненты ветра, атмосферное давление, массовая доля водяного пара, температура воздуха и подстилающей поверхности и т.п.) с пространственным распределением глобально и на 23 вертикальных уровнях. Данные GDAS получены при помощи объединения результатов моделирования атмосферного переноса и метеорологических измерений.

2.4. Спутниковые измерения SO_2

Данные о содержании диоксида серы в атмосфере получены с помощью спектрометра OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленном на спутнике Aura. Эти материалы доступны с августа 2004 года. Спектрометр со спектральным разрешением 0.63 нм работает в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах 264–504 нм. Пространственное разрешение (размер одного пикселя) в надире составляет 13×24 км, ширина полосы сканирования 2600 км. В настоящей работе использован стандартный продукт OMSO2e [Li et al., 2020], представляющий собой восстановленное ежесуточное суммарное содержание SO_2 во всем атмосферном столбе. Наземное разрешение продукта 0.25×0.25 градуса (около 25×25 км²), повторяемость съемки – 1 день. Обработка данных заключалась в построении в каждой точке средних значений в плавающем временном окне шириной 3 суток с целью снижения дисперсии данных, а также закрытия пропусков, вызванных облачностью.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование метеорологических параметров с помощью Enviro-HIRLAM

Проведен анализ соответствия временной изменчивости метеорологических параметров по данным моделирования Enviro-HIRLAM и измере-

ний в г. Мурманск за июнь 2011 г. Для анализа из соответствующей положению Мурманска (около 68.94° с.ш., 32.96° в.д.) ячейки модельных данных была извлечена информация о временном изменении метеорологических параметров. Затем были рассчитаны основные статистические характеристики для выявления различий между данными по каждому исследуемому метеорологическому параметру (табл. 1):

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N p_n^r - p_n^m}{N}, \quad (1)$$

где P – средняя ошибка моделирования параметра p ; p_n^m – модельное значение параметра p в момент времени n , $n = 1, 2, 3 \dots N$; p_n^r – измеренное на метеорологической станции значение параметра p в момент времени n .

$$\Sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (p_n^r - p_n^m - P)^2}{N}}, \quad (2)$$

где Σ – среднеквадратическое отклонение средней ошибки моделирования; P и Σ даны в % относительно среднему значению параметра p по данным измерений;

K – коэффициент корреляции Пирсона между данными моделирования и измерений.

На рис. 3 приведены гистограммы распределения четырех метеорологических параметров по данным измерений и моделирования. Лучше всего данные моделирования Enviro-HIRLAM согласуются с приземными температурой и относительной влажностью воздуха (табл. 1). Так, $P = 1.1\%$, а $\Sigma = 16.4\%$. Для влажности воздуха, эти ошибки, соответственно, оценены как $P = 3.8\%$ и $\Sigma = 18.2\%$.

Таким образом, модель Enviro-HIRLAM в среднем занижает температуру и относительную влажность воздуха у поверхности Земли. При этом коэффициенты корреляции между данными моделирования и измерениями для температуры и относительной влажности воздуха, соот-

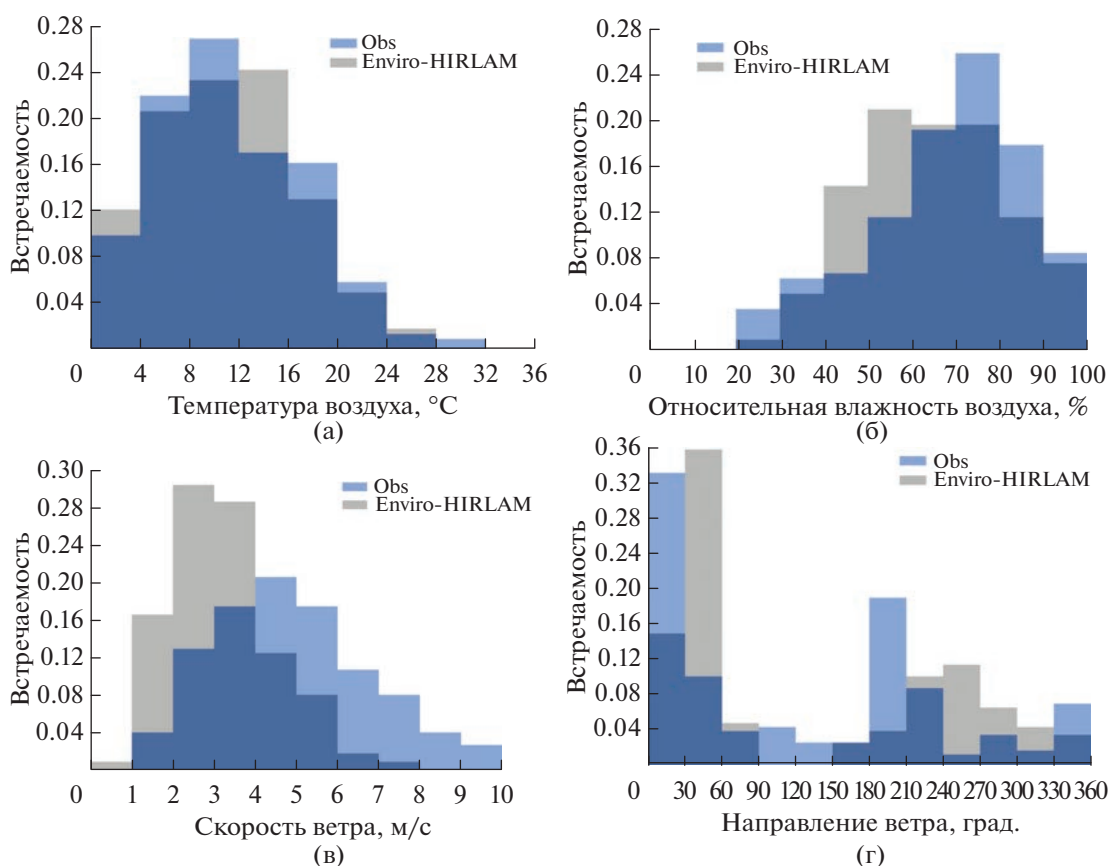


Рис. 3. Гистограммы распределения метеорологических параметров у поверхности Земли по данным измерений и моделирования Enviro-HIRLAM в г. Мурманск за июнь 2011 г.; а – температура воздуха, б – относительная влажность воздуха, в – скорость ветра, г – направление ветра.

ветственно, составили $K = 0.95$ и $K = 0.75$. Это указывает на хорошую достоверность моделирования временного изменения данных параметров. Наибольшее расхождение зафиксировано для направления ветра, для которого оценка относительной ошибки составила $P = 10.9\%$, но при высоком значении $K = 0.87$. При этом модель примерно на 29.2% занижает скорость ветра (рис. 3в), но при высоком значении $K = 0.75$.

Значительное расхождение данных модели Enviro-HIRLAM с результатами наблюдений для параметров ветра может быть связано со сложностями численного моделирования атмосферного переноса при относительно сложном рельефе Кольского полуострова. В целом, модель Enviro-HIRLAM адекватно представляет основные приземные метеорологические параметры, что говорит о возможности ее использования для анализа параметров приземного ветра на области исследования и оценки возможности трансграничного переноса SO_2 с территории Кольского полуострова на территорию Финляндии.

На рис. 2 представлено среднесуточное за 13 июня 2011 г. пространственное распределение

приземных скоростей и направлений ветра в пределах области исследования по данным численного моделирования Enviro-HIRLAM. В среднем, на территории Кольского полуострова и северной части Финляндии 13-го июня 2011 г. у поверхности Земли по данным моделирования преобладали В-СВ направления ветра. В соседние дни по данным моделирования направления ветра были примерно такими же. Необходимо отметить, что над территорией Баренцева моря, у берегов Кольского полуострова направления ветра также составляли В-СВ и ЮВ. Из этого можно предположить, что повышенная приземная концентрация SO_2 на границе России и Финляндии 13-го июня 2011 г. (рис. 1) могла быть вызвана переносом воздушных масс как с территории Кольского полуострова, так и от более удаленного источника. Одним из таких источников может быть ГМК г. Норильска (удаленность ~ 2280 км), попадающая по своему положению в диапазон направлений приземного ветра на территории исследования.

Потенциальным источником повышенной приземной концентрации SO_2 могут являться

естественные выбросы газа при извержениях вулканов (по некоторым оценкам в среднем до 15% всех глобальных эмиссий диоксида серы в год [Lamotte et al., 2021]). Анализ архивных данных об извержениях Северного полушария, случившихся в даты близкие к июню 2011 г. (<https://volcano.si.edu>, последний доступ в октябре 2022 г.) показал, что в период 21–28 мая 2011 г. в Исландии извергался вулкан Гримсвётн (Grímsvötn). Высота вулканического облака вулкана с первых дней извержения достигла около 20 км и продержалась почти до конца 22 мая [Gudmundsson et al., 2012]. Выбросы SO_2 составили 0.3 Мт за период 7 дней (<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=373010>). Согласно приведенное выше информации, годовая эмиссия SO_2 одного из самых крупных антропогенных источников этого газа, ГМК в г. Норильске, составляет менее 2.1 Мт в год (в среднем за 2004–2014 гг.). Т.е. суточные выбросы SO_2 от работы Норильской ГМК примерно в 7.4 раз меньше, чем при извержении вулкана Гримсвётн в мае 2011 г. В ряде исследований при помощи комплексных измерений и численного моделирования атмосферного переноса показано, что выбросы SO_2 при извержении вулкана могут быть зафиксированы на расстояниях в несколько тысяч километров [Lamotte et al., 2021; Gudmundsson et al., 2012; Tu et al., 2004; Andreae et al., 1988; Jaffe et al., 1999].

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ SO_2 ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ HYSPLIT

Для того, чтобы выяснить, могло ли извержение вулкана Гримсвётн в мае 2011 г. привести к увеличению приземной концентрации SO_2 в районе северной части Финляндии и, возможно, на Кольском полуострове, привлечены два источника дополнительной информации. Это данные спутникового зондирования SO_2 во всем атмосферном столбе прибором OMI и обратное во времени моделирование дисперсии частиц в атмосфере при помощи модели HYSPLIT.

В ходе численного эксперимента моделью HYSPLIT 13-го июня 2011 г. с финской станции Inari Raja-Jooseppi с высоты примерно 5 м было “выпущено” 5000 модельных частиц, которые затем переносились во времени на 10 дней назад (т.е. до 3-го июня). Пространственное разрешение по горизонтали составило 0.5° , по вертикали рассматривался один слой высотой до 10 км. Результаты моделирования выводились с интервалом каждые 3 ч в виде пространственного распределения массовой доли частиц в воздухе.

Данные численного моделирования (см. 1 в легенде на рис. 4) были объединены с результатами спутниковых измерений SO_2 (показаны цветом на рис. 4) в период с 3 по 13-е июня 2011 г. Это

сделано для того, чтобы проследить возможное пересечение модельных данных (1 на рис. 4) с измеренными спутником повышенными содержаниями SO_2 , выброшенными в атмосферу при извержении вулкана Гримсвётн. Кроме того, на рис. 4 нанесена одна обратная траектория движения частицы (2 на рис. 4), выпущенная также 13-го июня от Inari Raja-Jooseppi (4 на рис. 4). Данная траектория используется для наглядности представления основного направления движения частиц. Положение частицы в конкретный день выделено на траектории треугольником, вершина которого указывает на направление движения частицы (3 на рис. 4).

Необходимо отметить сложность формы полученной траектории движения частицы в атмосфере. По данным моделирования воздушная масса в период 3–13 июня 2011 г. двигалась над территорией Гренландии, где 4-го июня захватила облако SO_2 , выброшенное в конце мая вулканом в Исландии. Далее воздушные массы двигались на восток вдоль побережья Российской Арктики, но в районе п-ва Таймыр повернули на север. Достигнув северного полюса воздушные массы повернули на юг к Финляндии, где к 13-му июня 2011 г. достигли финской станции Inari Raja-Jooseppi. При этом при перемещении вдоль побережья арктической части России, модельная воздушная масса несколько раз пересекается с более низкими значениями содержания газа (например, 6–8 июня).

Многие исследования показали, что среднее “время жизни” SO_2 в нижней атмосфере составляет ~1–3 дней [Lee et al., 2011; Beirle et al., 2014]. Оно преимущественно определяется реакцией молекул SO_2 в газовой фазе с радикалами OH с последующим превращением в молекулу серной кислоты в жидкой фазе (H_2SO_4) и выпадением под действием сил, действующих в атмосфере или осадков. Кроме того, молекула SO_2 в газовой фазе может быть поглощена молекулой воды в жидкой фазе с последующим образованием сульфатных аэрозолей и выпадением из атмосферы [Спахова и др., 1978; Seinfeld et al., 1998]. Поэтому возникает вопрос — почему отмеченное нами время переноса SO_2 от Исландии до севера Финляндии (более 20 дней) превышает среднее “время жизни” SO_2 в атмосфере? Во-первых, вулкан Гримсвётн выбросил огромное количество SO_2 (относительно антропогенных эмиссий), что потребовало бы большого количества осадков для его осаждения. Во-вторых, на высоте в несколько километров, куда после извержения переместилась большая часть вулканического SO_2 (высота вулканического облака превысила 10 км в первые дни извержения), водяного пара меньше, чем в приземном слое. Все это должно увеличивать “время

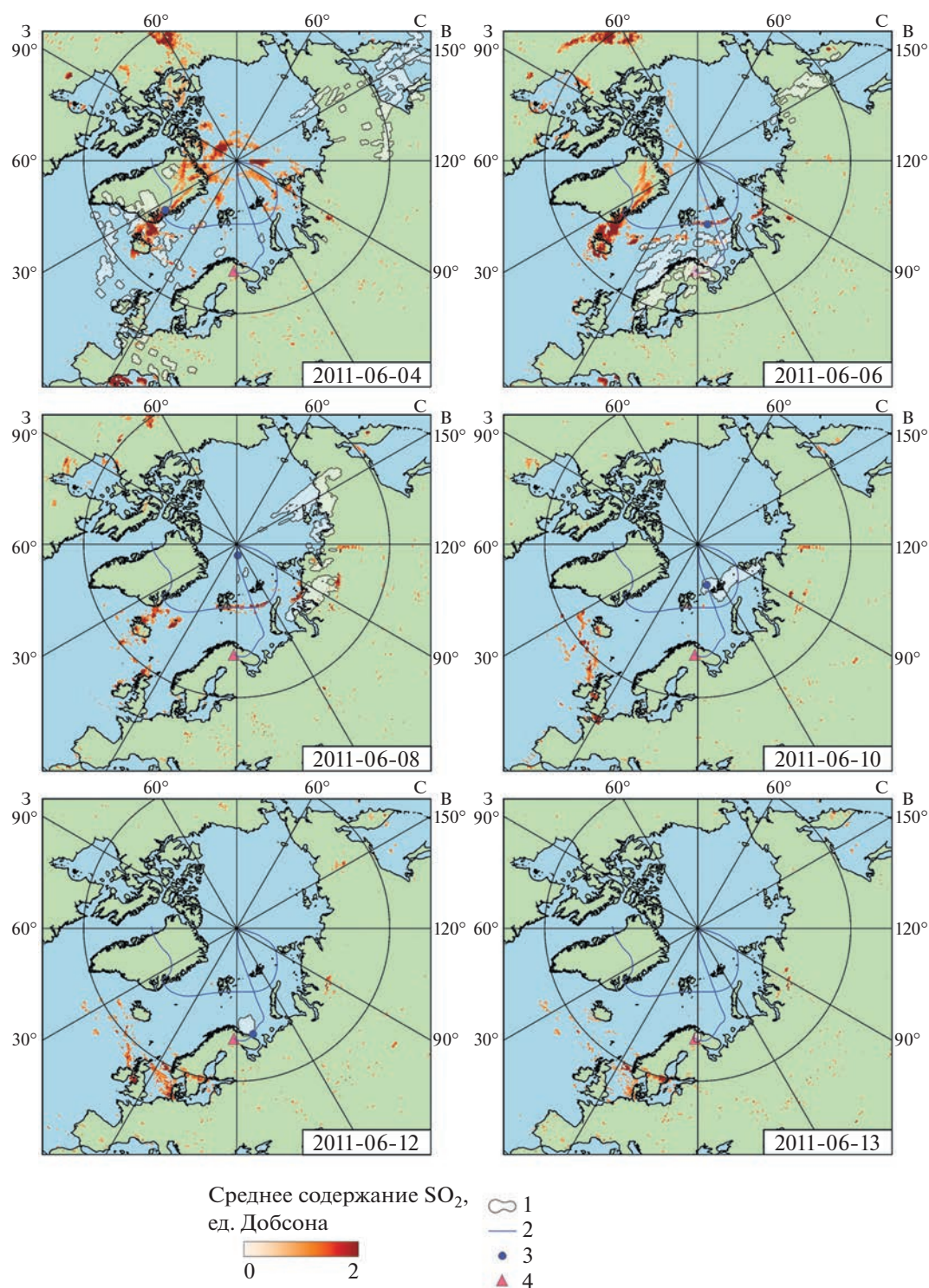


Рис. 4. Общее содержание SO_2 в атмосфере на основе спутникового зондирования и результаты обратного моделирования дисперсии частиц от финской станции Inari Raja-Jooseppi за период 4–13 июня 2011 г. Условные обозначения: 1. Результат моделирования обратного переноса частиц в атмосфере; 2. Обратная траектория движения одной частицы на основе моделирования HYSPLIT; 3. Треугольник, показывающий на траектории местоположение и направление движения частицы на данную дату (см. в правом нижнем углу карто-схемы); 4. Местоположение финской станции Inari Raja-Jooseppi.

жизни” молекул газа в слое верхней тропосферы по отношению, например, к приземному слою.

Анализ же литературы о примерах дальнего переноса SO_2 показал, например, что был зарегистрирован перенос SO_2 продолжительностью 4–8 дней из Восточной Азии через Тихий океан на западное побережье штата Вашингтон [Tu et al., 2004; Andreae et al., 1988]. Аналогично, в обсерватории Чика-Пик в штате Вашингтон в марте–апреле 1997 г. был зарегистрирован шестидневный перенос SO_2 из Азии на территорию Северной Америки [Jaffe et al., 1999]. Этими исследованиями было показано, что перенос SO_2 воздушными массами на большие расстояния определяется, в основном, динамикой атмосферы. Благоприятными условиями при этом являются атмосферные слои с малой турбулентностью, низким содержанием водяного пара и наличие температурной инверсии [Tu et al., 2004]. Проведенное нами сравнение спутниковых наблюдений за SO_2 и результатов химико-транспортных моделей подтвердило эту закономерность.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышение концентраций SO_2 на севере Финляндии может быть вызвано не только техногенными факторами, но и таким мощным природным фактором как извержение Исландских вулканов.

Данный вывод содержит несколько допущений, полное принятие во внимание которых может добавить значительную неопределенность в итоговый результат. Например, так как рассматривается перенос частиц в одном слое до 10 км, неизвестно, на какой высоте перемещаются моделируемые частицы, а на какой происходил реальный перенос SO_2 от извержения вулкана. Поэтому, безусловно, требуется дальнейшее изучение этой проблемы с набором большей статистики.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании рассмотрен вопрос о природе зарегистрированного случая повышенной приземной концентрации SO_2 на севере Финляндии в июне 2011 г. Совместное использование численного моделирования атмосферных процессов и спутникового дистанционного зондирования содержания малых газовых составляющих атмосферы позволило обосновать гипотезу о вулканическом источнике, вызвавшем повышение концентрации SO_2 на севере Финляндии в июне 2011 г.

Для верификации этой гипотезы требуется набор статистики на севере Финляндии в периоды близкие к другим эксплозивным событиям на острове Ян-Майен и в Исландии.

По результатам настоящего исследования можно сделать следующие выводы:

1. Причинами повышенной приземной концентрации SO_2 по данным измерений на севере Финляндии могут являться не только местные техногенные источники, но и удаленный перенос загрязнителей от вулканических извержений. При помощи моделирования переноса частиц в атмосфере и спутниковых измерений показано, что измеренные на финской станции Inari Raja-Joosperi 13-го июня 2011 г. пики в значениях приземной концентрации SO_2 могли быть вызваны извержением вулкана Гримсвётн на о. Исландия в конце мая 2011 г. Это указывает на неоднозначность выводов о продолжающихся трансграничных переносах техногенного SO_2 с территории России.

2. Численная модель Enviro-HIRLAM адекватно представляет основные приземные метеорологические параметры в период июня 2011 г. на территории Кольского полуострова, что говорит о возможности ее использования в исследовании динамики загрязнителей воздуха у поверхности Земли в Арктическом регионе России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов В. С. Диоксид серы и основные источники загрязнения атмосферы диоксидом серы // Научный журн. 2017. № 6-1(19). С. 18–20.
- Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области за 2018 г. // 2019 г. <https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/okhrana-okruzhayushchey-sredy/00.condition/index.php> (дата обращения 20.06.22).
- Неробелов Г.М., Седеева М.С., Махура А.Г., Нутерман Р.Б., Смышляев С.П. Enviro-HIRLAM моделирование переноса атмосферных загрязнителей и воздействия аэрозолей на метеорологические параметры над северо-западной частью России и Северной Европой // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием “Земля и космос” к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20–21 октября 2020 года, Санкт-Петербург. Сборник статей. СПб.: 2020. 334 с.
- Каролин С. Программа “Пасвик” — общий отчет 2008 // 2008. http://www.pasvikmonitoring.org/pdf/Pasvik-programmet_summary_rus_.pdf.
- Спахова А.С., Рязанцева Л.А. Повреждаемость некоторых древесных растений сернистым газом // Физиология растений. 1978. Т. 25. № 2. С. 407–409.
- Шлегель К.Д., Верхотуров С.С. Токсикологические свойства газообразных загрязнений и их влияние на организм человека // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. № 12. С. 946–948.
- Andreae M.O. et al. Vertical distribution of dimethylsulfide, sulfur dioxide, aerosol ions, and radon over the north-

- east Pacific Ocean // *J. Atmospheric Chemistry*. 1988. T. 6. № 1. С. 149–173.
- Baklanov A. et al. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) // *Geoscientific Model Development*. 2017. T. 10. № 8. С. 2971–2999. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>
- Beirle S., Hörmann C., Penning de Vries M., Dörner S., Kern C., Wagner T. Estimating the volcanic emission rate and atmospheric lifetime of SO₂ from space: a case study for Kīlauea volcano, Hawai‘I // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. 14. P. 8309–8322. <https://doi.org/10.5194/acp-14-8309-2014>
- Fioletov V.E., McLinden C.A., Krotkov N., Li C., Joiner J., Theys N., Carn S., Moran M.D. A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument. // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 11497–11519. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11497-2016>
- Fuentes García G., Echeverría R.S., Reynoso A.G., Baldasano Recio J.M., Rueda V.M., Retama Hernández A., Kahl J.D.W. Sea Port SO₂ Atmospheric Emissions Influence on Air Quality and Exposure at Veracruz, Mexico // *Atmosphere*. 2022. V. 13. 1950. <https://doi.org/10.3390/atmos13121950>
- Gudmundsson M.T., Höskuldsson Á., Larsen G., Thordarson T., Ólafsdóttir B.A., Oddsson B., Gudnason J., Högnadóttir T., Stevenson J.A., Houghton B.F., McGarvie D., Sigurdardóttir G.M. The May 2011 eruption of Grímsvötn // *EGU 2012*. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/EGU2012-12119.pdf>
- Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhardt J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strm J., Stohl A. // Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output, *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. 669693. <https://doi.org/10.5194/acp-10-669-2010>
- Jaffe D. et al. Transport of Asian air pollution to North America // *Geophysical Research Letters*. 1999. T. 26. № 6. P. 711–714.
- Khokhar M.F., Frankenberg C., Van Roozendaal M., Beirle S., Kuhl S., Richter A. et al. Satellite observations of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Adv. Space Res.* 2005. V. 36. 879887.
- Kyrö E.-M., Väänänen R., Kerminen V.-M., Virkkula A., Petäjä T., Asmi A., Dal Maso M., Nieminen T., Juhola S., Shcherbinin A., Riipinen I., Lehtipalo K., Keronen P., Aalto P.P., Hari P., Kulmala M. Trends in new particle formation in eastern Lapland, Finland: effect of decreasing sulfur emissions from Kola Peninsula // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 4383–4396. <https://doi.org/10.5194/acp-14-4383-2014>
- Lamotte C., Guth J., Maréchal V., Cussac M., Hamer P.D., Theys N., Schneider P. Modeling study of the impact of SO₂ volcanic passive emissions on the tropospheric sulfur budget // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 11379–11404. <https://doi.org/10.5194/acp-21-11379-2021>
- Lee C., Martin R.V., van Donkelaar A., Lee H., Dickerson R.R., Hains J.C., Krotkov N., Richter A., Vinnikov K., Schwab J.J. SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space-based (SCIAMACHY and OMI) observations // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D06304. <https://doi.org/10.1029/2010JD014758>
- Li C., Krotkov N.A., Leonard P. OMI/Aura Sulfur Dioxide (SO₂) Total Column L3 1 day Best Pixel in 0.25 degree x 0.25 degree V3, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2020. Accessed: 2022-10-01. <https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3008>
- Mahura A., Gonzalez-Aparacio I., Nuterman R., Baklanov A. Seasonal Impact Analysis On Population Due To Continuous Sulphur Emissions From Severonikel Smelters Of The Kola Peninsula // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. V. 11. № 1. P. 130–144. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-130-144>
- Paez P.A., Cogliati M.G., Caselli A.T., Monasterio A.M. An analysis of volcanic SO₂ and ash emissions from Copahue volcano // *J. South American Earth Sciences*. 2021. V. 110. 103365.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 1998. p. 1326.
- Sipilä M., Sarnela N., Neitola K., Laitinen T., Kemppainen D., Beck L., Duplissy E.-M., Kuittinen S., Lehmusjärvi T., Lampilahti J., Kerminen V.-M., Lehtipalo K., Aalto P.P., Keronen P., Siivola E., Rantala P.A., Worsnop D.R., Kulmala M., Jokinen T., Petäjä T. Wintertime subarctic new particle formation from Kola Peninsula sulfur emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 17559–17576. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17559-2021>
- Sportisse B. Fundamentals in Air Pollution – From Processes to Modelling // Springer Dordrecht. 2009. p. 299.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System // *Bull. American Meteorological Society*. 2015. V. 96. № 12. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Tu F.H. et al. Long-range transport of sulfur dioxide in the central Pacific // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2004. T. 109. № D15.
- Wallace J.M., Hobbs P.V. Atmospheric science: an introductory survey. // Elsevier Academic Press: Amsterdam, The Netherlands. 2006. T. 92.
- World Health Organization. Regional Office for Europe. Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide // World Health Organization. Regional Office for Europe. 2006. P. 484. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>

Integration of Satellite Monitoring and Mathematical Modeling in the Analysis of the Nature of Elevated Sulfur Dioxide Concentrations in the Surface Air of the Northern Part of Finland

E. D. Dryukova¹, G. M. Nerobellov^{2,3,*}, M. S. Sedeeva², A. V. Kiselev², A. G. Mahura⁴, and V. I. Gorniy²

¹*Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinskiy Prospekt, 98, Saint-Petersburg, 195196 Russia*

²*SPC RAS - Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences, Korpusnaya st., 18, Saint-Petersburg, 187110 Russia*

³*Saint-Petersburg State University, University Embankment, 7/9, Saint-Petersburg, 199034 Russia*

⁴*University of Helsinki, Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR)/Physics, Faculty of Science, Kumpula campus, Gustaf Hallstrominkatu 2a, Helsinki, FI-00560 Finland*

**e-mail: akulishe95@mail.ru*

The article is devoted to the investigation of the nature of the increment in surface concentration of toxic gas sulfur dioxide (SO₂) in Northern Finland. The study is carried out for June 2011 when the increased near-surface SO₂ concentration was registered at Finnish observation station Inari Raja-Jooseppi together with the surface wind blowing from the territory of the Kola Peninsula. The hypothesis of natural increment of near-surface SO₂ concentration as a result of Grímsvötn volcano eruption (Iceland) is verified using satellite SO₂ observations by OMI, numerical weather prediction and atmospheric chemistry model Enviro-HIRLAM and particle dispersion model HYSPLIT. The results show that not only local man-made sources, but also the remote transfer of pollutants from volcanic eruptions can cause an increased near-surface SO₂ concentration. To verify this hypothesis, a large set of statistics is required in Northern Finland during periods of volcanic activity in Iceland.

Keywords: Northern Finland, near-surface SO₂ concentration, volcanic eruptions, Enviro-HIRLAM, HYSPLIT, satellite observations