

Анализ многолетних данных содержания экотоксикантов в атмосфере Российской Федерации по спутниковым данным

А. А. Тронин¹, М. П. Васильев¹, А. В. Киселев¹, Г. М. Неробелов^{1,2,3}

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия

³ Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 192007, Россия

Аэротоксиканты — загрязнители атмосферного воздуха (аэрозоль, диоксиды азота и серы, формальдегид и оксид углерода) оказывают существенное воздействие на здоровье людей и экосистемы. Анализ содержания экотоксикантов имеет большое значение для понимания процессов в приземном слое атмосферы и мониторинга качества воздуха. В последние десятилетия развивается система дистанционных методов получения информации о загрязнении атмосферы, основанная на приборах дистанционного зондирования Земли. С использованием спутниковых наблюдений в исследовании были проанализированы многолетние данные о содержании аэротоксикантов, а также водяного пара и интенсивности солнечного излучения в атмосфере над территорией 89 субъектов Российской Федерации, проведена статистическая обработка данных. Вычислены тренды концентрации аэротоксикантов и определена их статистическая значимость. В результате обработки изображений построены карты средних многолетних значений и среднеквадратического отклонения концентрации аэротоксикантов, а также карты трендов концентрации для всех регионов России и сопредельных территорий. Анализ данных показал явную связь высокой концентрации диоксидов азота и серы с городскими и промышленными агломерациями. Повышенная концентрация аэрозоля и угарного газа скорее всего связана с эмиссией от лесных пожаров. Для большинства субъектов отмечен рост содержания диоксида азота и серы, аэрозоля и солнечной радиации, хотя в регионах с высокой концентрацией диоксида азота, таких как Москва, Санкт-Петербург, Московская и Ленинградская области, наблюдается её снижение. Уменьшение среднегодовых значений формальдегида, угарного газа и водяного пара отмечается для большинства регионов. Возможности спутниковой съёмки для определения концентрации аэротоксикантов непрерывно улучшаются, растёт доступность материалов. Всё это делает спутниковые наблюдения в сочетании с наземными измерениями полезным инструментом для анализа экологической ситуации на больших территориях.

Ключевые слова: аэротоксикант, субъект Российской Федерации, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 24.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-333-348

Введение

Загрязнение атмосферы — одна из наиболее острых экологических проблем современности, оказывающая значительное влияние на здоровье человека, климат и экосистемы. Основные аспекты этой проблемы включают поиск и анализ источников загрязнения, определение последствий загрязнения воздуха для человека и экосистем, а также возможные пути улучшения ситуации. Данные Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) показывают, что почти всё население мира (99 %) дышит воздухом, уровень загрязнённости которого превышает рекомендуемые ВОЗ предельные значения (https://www.who.int/ru/health-topics/air-pollution#tab=tab_1). Согласно докладу Минприроды «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» за 2023 г., в 200 городах России (81 % городов из числа тех, где проводятся наблюдения) с населением 73,2 млн средняя за год концентрация какого-либо

загрязняющего вещества превысила 1 ПДК (предельно допустимая концентрация) (О состоянии..., 2024).

Спутниковые методы контроля загрязнения атмосферы представляют собой современный инструмент для мониторинга качества воздуха на глобальном и региональном масштабе. Они позволяют получать данные о концентрации различных загрязняющих веществ в атмосфере, отслеживать их распространение и анализировать динамику изменений. Эти методы особенно полезны для охвата труднодоступных регионов и обеспечения непрерывного мониторинга в режиме реального времени, тогда как наземная сеть наблюдений за качеством воздуха охватывает главным образом городские поселения.

Спутники оснащаются спектрометрами и радиометрами, которые измеряют отражённое солнечное излучение или собственное тепловое излучение Земли. На основе этих данных можно определить концентрацию загрязняющих веществ — аэротоксикантов — в атмосферном воздухе, таких как диоксиды азота (NO_2) и серы (SO_2), формальдегид (CH_2O), угарный газ (CO). Спутники измеряют оптическую толщину аэрозолей AOD (*англ.* Aerosol Optical Depth), что позволяет оценить концентрацию твёрдых частиц (PM 2.5, PM 10) в атмосфере. Кроме перечисленных аэротоксикантов были проанализированы спутниковые данные о содержании водяного пара и приходящем солнечном излучении.

Спутниковые методы контроля загрязнения атмосферы играют ключевую роль в понимании и решении проблем экологической безопасности. Они предоставляют уникальные возможности для глобального мониторинга, анализа и прогнозирования качества воздуха, что особенно важно в условиях растущей урбанизации и изменения климата. Значительное число исследований отечественных и зарубежных авторов посвящается сейчас использованию результатов спутниковых наблюдений для решения прикладных задач, касающихся загрязнения воздуха (например, (Морозова и др., 2022; Тронин и др., 2023; Boesch et al., 2020)).

С учётом указанных источников информации в настоящем исследовании выполнен анализ пространственно-временного изменения содержания ряда экотоксикантов в воздухе на территории Российской Федерации.

Данные и методы

Таблица 1. Атмосферные параметры и источники спутниковых данных, используемые в исследовании

Параметр	Тип данных	Источник	Используемый период покрытия, годы	Пространственное разрешение продукта, град
NO_2	Общее содержание, ежедневные	Спутник Aura, прибор OMI, https://disc.gsfc.nasa.gov/	2004–2023	0,25
SO_2			2004–2022	0,10
HCHO			2004–2023	0,25
Аэрозольная оптическая толщина	Аэрозольная оптическая толщина во всей атмосфере, ежедневные			
CO	Общее содержание, среднемесячные	Спутники серии MetOp, прибор IASI, https://iasi.aeris-data.fr/	2007–2023	1
H_2O		Спутник Aqua, прибор AIRS, https://disc.gsfc.nasa.gov/	2004–2023	1
Приходящее солнечное излучение (инсоляция)	Инсоляция, среднемесячные	Спутники Terra и Aqua, прибор MODIS, https://neo.gsfc.nasa.gov	2006–2023	0,25

В исследовании использованы данные о содержании SO_2 , NO_2 , CH_2O , CO , аэрозоля, водяного пара и приходящего солнечного излучения на основе измерений спутниковых систем Aura (спектрометр OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument)), MetOp (прибор IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)), Terra и Aqua (инструменты MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и AIRS (*англ.* Atmospheric Infrared Sounder)). Применяемые наборы данных покрывают период с 2004 по 2023 г. Такие характеристики, как тип, период и пространственное разрешение спутниковых данных представлены в *табл. 1*.

Ниже приведено краткое описание спутниковых приборов и полученных на основе их измерений данных о состоянии атмосферы, которые используются в текущем исследовании.

OMI

Спектрометр OMI на борту спутника Aura (Levelt et al., 2006) измеряет отражённое и рассеянное солнечное излучение на орбите Земли с 2004 г. Прибор регистрирует электромагнитное излучение в диапазоне 270–500 нм со спектральным разрешением $\sim 0,5$ нм. Максимальное пространственное разрешение прибора составляет 13×24 км (Ozone..., 2009). Благодаря полю зрения прибора OMI в 2600 км глобальное покрытие измерениями достигается ежедневно. На основе измеренных спектров и разработанных математических алгоритмов восстанавливается атмосферное содержание ряда газов и аэрозолей.

В исследовании используются данные о содержании SO_2 (<https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3008>), NO_2 (<https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA2018>), CH_2O (<https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3010>) и аэрозолей (в виде аэрозольной оптической толщи) (<https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3004>) в атмосфере по спутниковым измерениям OMI. Основные принципы алгоритмов восстановления содержания исследуемых примесей описаны в публикации (OMI..., 2002). Данные получены из источника <https://disc.gsfc.nasa.gov/> с пространственным разрешением 0,25 и 0,1° (НСНО) за каждый день периода с 2004 по 2023 г.

AIRS

Прибор AIRS размещён на борту спутника Aura, который находится на земной орбите с 2002 г. Инструмент регистрирует уходящее от Земли и атмосферы длинноволновое излучение в диапазонах 0,4–1,0 (4 канала) и 3,7–15,4 мкм (2378 каналов). С полем зрения прибора в 1650 км и пространственным разрешением 13,5 км измерения покрывают всю земную поверхность ежедневно. Результаты измерений уходящего излучения Земли могут быть использованы для восстановления содержания водяного пара в атмосфере благодаря покрытию прибором излучения в одной из полос поглощения этого газа (6,3 мкм) (Kahn et al., 2014). В исследовании применяются данные о среднемесечном содержании водяного пара в атмосфере Земли с пространственным разрешением 1° за период 2004–2023 гг.

IASI

Прибор IASI представляет собой инфракрасный фурье-спектрометр и расположен на спутниках серии MetOp (-А, -В и -С) (Clerbaux et al., 2009), которые с 2006 г. находятся на земной орбите (спутник MetOp-А). Спектрометр IASI регистрирует уходящее от Земли длинноволновое излучение в диапазоне 645–2760 см^{-1} со спектральным разрешением 0,3–0,5 см^{-1} . Глобальное покрытие измерениями IASI достигается дважды в день, пространственное разрешение составляет 4×12 км с полем зрения прибора 2200 км. Подробности алгоритма восстановления СО из спутниковых измерений IASI можно найти в работе (Pommier et al., 2010).

В текущем исследовании использовались данные об общем содержании СО в атмосфере на основе измерений IASI со спутников MetOp-А и -В. Данные получены из источника

<https://iasi.aeris-data.fr> и представляют собой среднемесячные значения на регулярной сетке с пространственным разрешением 1° глобально за период 2007–2023 гг.

MODIS

Прибор MODIS размещён на борту спутников Terra и Aqua. Инструмент измеряет отражённое и уходящее от Земли излучение в 36 каналах. Глобальное покрытие измерениями достигается один-два раза в день (в зависимости от типа данных), пространственное разрешение находится в диапазоне 0,25–1 км. В исследовании используются данные о солнечном излучении у поверхности Земли на основе измерений прибором MODIS.

Результаты

По результатам съёмок были рассчитаны средние многолетние, минимальные и максимальные значения наблюдаемых параметров для 89 субъектов Российской Федерации. В расчётах использовались данные за целый год наблюдения. Результаты приведены в *табл. 2*.

Таблица 2. Средние многолетние, минимальные и максимальные значения наблюдаемых параметров для всех субъектов

Компонент, единицы измерения	Период наблюдения, годы	Среднее	Минимальное	Максимальное
NO ₂ , молекул/см ²	2005–2023	$4,55 \cdot 10^{15}$	$2,76 \cdot 10^{15}$	$1,20 \cdot 10^{16}$
SO ₂ , DU	2005–2023	0,102	0,047	0,182
CH ₂ O, молекул/см ²	2005–2021	$1,26 \cdot 10^{15}$	$8,36 \cdot 10^{14}$	$1,58 \cdot 10^{15}$
CO, молекул/см ²	2008–2023	$2,00 \cdot 10^{18}$	$1,64 \cdot 10^{18}$	$2,29 \cdot 10^{18}$
Аэрозоль, оптическая толщина	2005–2023	0,52	0,24	0,91
Солнечная радиация, Вт/м ²	2007–2023	150,63	106,89	192,41
H ₂ O, кг/м ²	2003–2023	12,97	7,41	17,99

Единица Добсона DU (*англ.* Dobson unit) — это единица измерения количества озона (или другого следового газа) в вертикальном столбе атмосферы Земли, она составляет $2,69 \cdot 10^{16}$ молекул озона на квадратный сантиметр. В настоящее время единица Добсона традиционно используется в физике атмосферы для содержания озона и диоксида серы. В связи с этим представляется целесообразным сохранить для диоксида серы единицу измерения — единицу Добсона.

Таблица 3. Корреляционная матрица средних многолетних наблюдаемых параметров

	NO ₂	SO ₂	CH ₂ O	CO	Аэрозоль	Солнечная радиация	H ₂ O
NO ₂	1	0,49	0,45	0,27	–0,15	–0,11	0,40
SO ₂		1	0,10	0,38	–0,04	–0,13	0,25
CH ₂ O			1	0,14	–0,22	0,24	0,58
CO				1	0,23	–0,34	0,15
Аэрозоль					1	–0,62	–0,77
Солнечная радиация						1	0,48
H ₂ O							1

Максимальные значения концентрации NO_2 зафиксированы в Москве в 2024 г., SO_2 — в Донецкой Народной Республике в 2012 г., CH_2O — в Севастополе в 2022 г, CO — в Сахалинской области в 2010 г., аэрозоля — в Республике Саха (Якутия) в 2024 г.

Корреляционная матрица средних многолетних наблюдаемых параметров приведена в табл. 3. Расчёты были проведены для 89 регионов. Критические значения коэффициентов корреляции составляют величину 0,28 для уровня значимости 99 % и 0,35 для уровня значимости 99,9 %. Значения модуля коэффициента корреляции, превышающие эти величины, рассматриваются как значимые.

Наиболее высокие отрицательные коэффициенты корреляции зарегистрированы для пар аэрозоль—солнечная радиация, аэрозоль—содержание водяного пара и CO —солнечная радиация. Максимальные положительные корреляции отмечаются для пар NO_2 — SO_2 , NO_2 — CH_2O , а также пар H_2O — CH_2O и H_2O —солнечная радиация.

Анализ распределений является важным инструментом выявления источников эмиссии загрязнителей в атмосферу. Распределение концентрации NO_2 , SO_2 , CO и аэрозоля приведено на рис. 1. По оси абсцисс отложены диапазоны концентрации, по оси ординат — частота встречаемости.

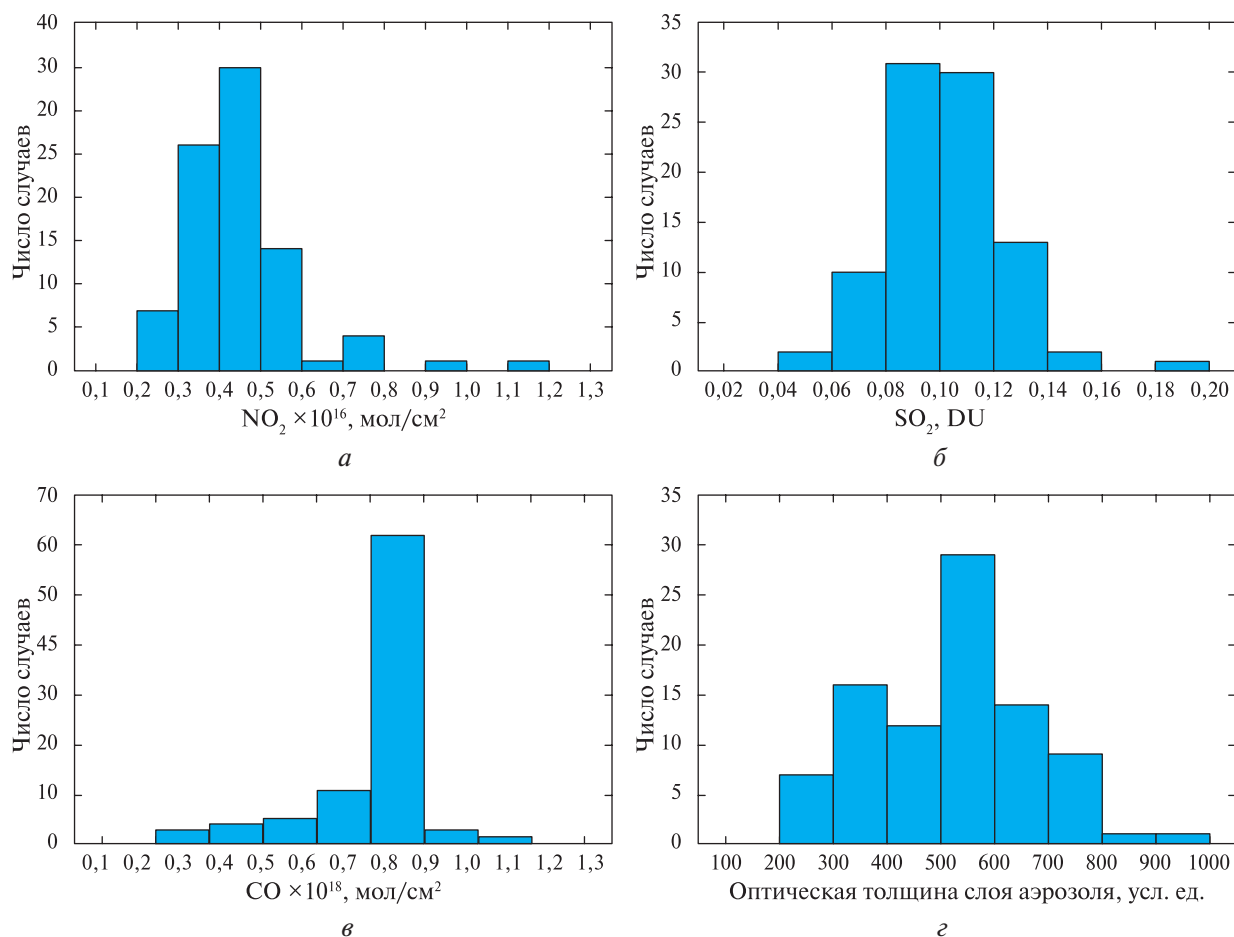


Рис. 1. Распределение средних многолетних значений концентрации:
а — NO_2 ; б — SO_2 ; в — CO ; г — аэрозоля

Согласно рис. 1, наблюдаемые в атмосфере экотоксиканты имеют различные типы распределения. Распределение NO_2 соответствует нормальному с «тяжёлым хвостом», что свидетельствует о наличии высокоинтенсивных источников эмиссии. Распределение SO_2 и аэрозоля близко к нормальному, что указывает на формирование концентрации как результат суммирования случайных вариаций. Распределение CO имеет два «хвоста» — в области высо-

ких и низких значений. Эти выводы справедливы при делении территории по границам субъектов Федерации. Анализ данных на уровне пространственного разрешения приборов дистанционного зондирования даёт несколько другие результаты (см. следующий раздел).

На рис. 2–6 приведены карты среднемноголетнего содержания NO_2 , SO_2 , CO , CH_2O и аэрозоля и их среднеквадратического отклонения (СКО).

Из рис. 2 прослеживается явная связь высокой концентрации NO_2 с городскими агломерациями Москвы и Санкт-Петербурга, промышленными регионами Кузбасса, Урала, Татарстана. Анализируя табличные данные и изображения можно сделать предположение о существовании значительного переноса NO_2 атмосферными потоками. Вероятно, существует внутренний трансграничный перенос газа из Москвы в Ярославскую, Ивановскую и Владимирскую области в соответствии с розой ветров в Московском регионе с преобладанием северо-западных и юго-западных ветров. По-видимому, существует и трансграничный перенос на российско-китайской границе от Амурской области до Приморского края. Карта стандартного отклонения соответствует карте средних значений, что означает наличие постоянно действующих источников газа.

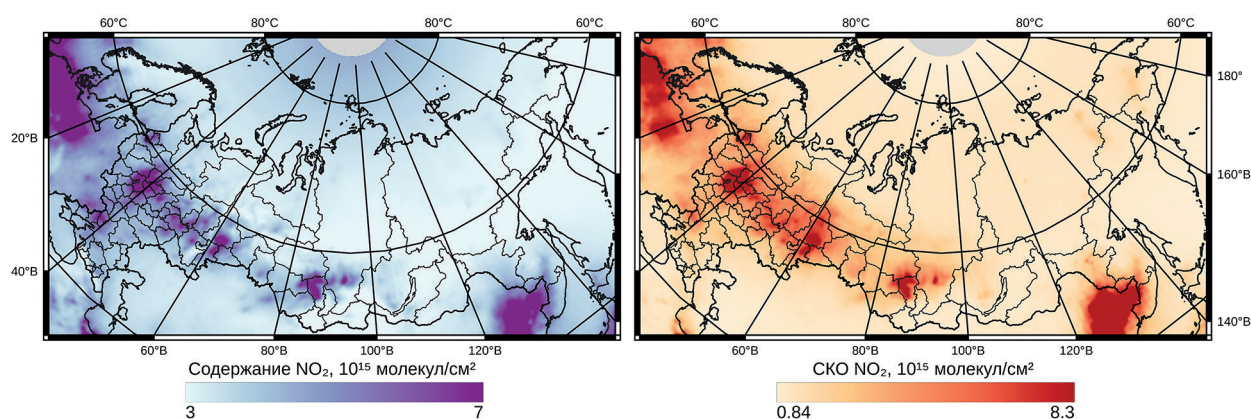


Рис. 2. Среднемноголетнее содержание и СКО NO_2 с 2005 по 2023 г.

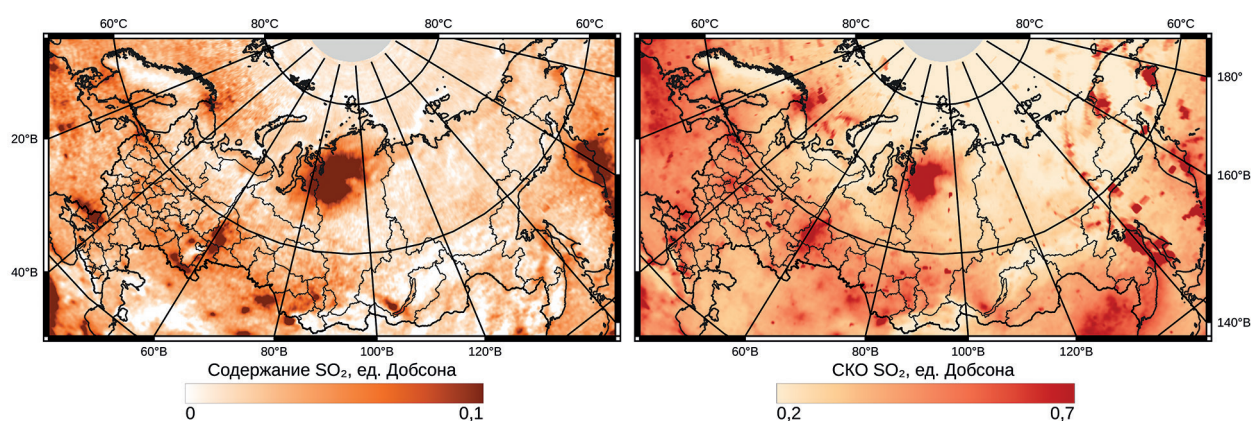


Рис. 3. Среднемноголетнее содержание и СКО SO_2 с 2005 по 2023 г.

Рисунок 3 для содержания SO_2 в атмосфере демонстрирует яркие примеры антропогенных и природных источников экотоксиканта. Наиболее значительным источником SO_2 в России является Норильский горно-металлургический комбинат, другими источниками выступают промышленные регионы, связанные с цветной металлургией и угольной генерацией электроэнергии: Донецкая Народная Республика, Урал, Кузбасс, район Иркутского угольного бассейна. Камчатские вулканы служат мощным природным источником SO_2 , который переносится на другие регионы Дальнего Востока. Заметим, что несмотря на значительную анома-

лию SO_2 , сопряжённую с Норильском, средние многолетние значения для Красноярского края не выделяются на общем фоне промышленных регионов. Это связано, конечно, с огромной площадью региона. Карта стандартного отклонения соответствует карте средних значений только для регионов, имеющих постоянные антропогенные источники. Высокие значения стандартного отклонения на Дальнем Востоке связаны с редкими, но интенсивными выбросами газа при вулканических извержениях.

Рисунок 4 с распределением аэрозоля по территории России значительно отличается от рис. 2 и 3 для NO_2 и SO_2 . Максимальные значения концентрации зафиксированы в Сибири и на Дальнем Востоке, главным образом в малозаселённых районах, не подверженных антропогенной нагрузке. По-видимому, такое распределение объясняется распространением лесных пожаров по территории страны (Котельников и др., 2023). Карта стандартного отклонения также указывает на наличие высокоинтенсивных, но непостоянных источников.

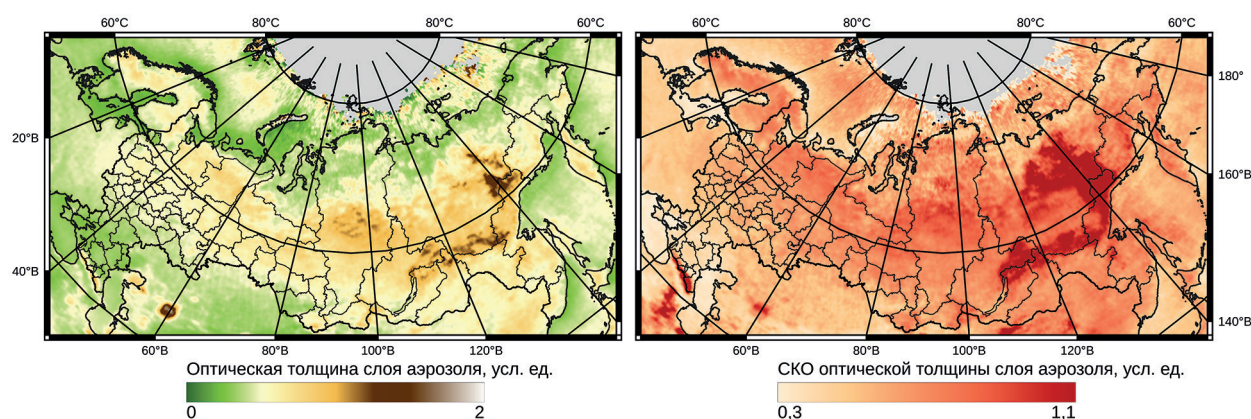


Рис. 4. Среднемноголетнее содержание и СКО аэрозоля с 2005 по 2023 г.

Рисунок 5 для CO , с одной стороны, похож на пространственное распределение аэрозоля на рис. 4, с другой стороны, на нём хорошо видна зависимость концентрации газа от высоты: в горных районах концентрация ниже, чем на равнинах. Такое проявление рельефа вероятно говорит о том, что газ хорошо перемешан в атмосфере. Максимумы концентрации зафиксированы в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Подобную особенность пространственного распределения общего содержания CO на основе спутниковых измерений можно наблюдать, например, в исследовании (Borsdorff et al., 2018). Более низкие значения содержания CO в атмосфере наблюдаются над горными системами в Европе и Северной Америке. Карта стандартного отклонения указывает на наличие высокоинтенсивных, но непостоянных источников в этих регионах — очагов лесных пожаров.

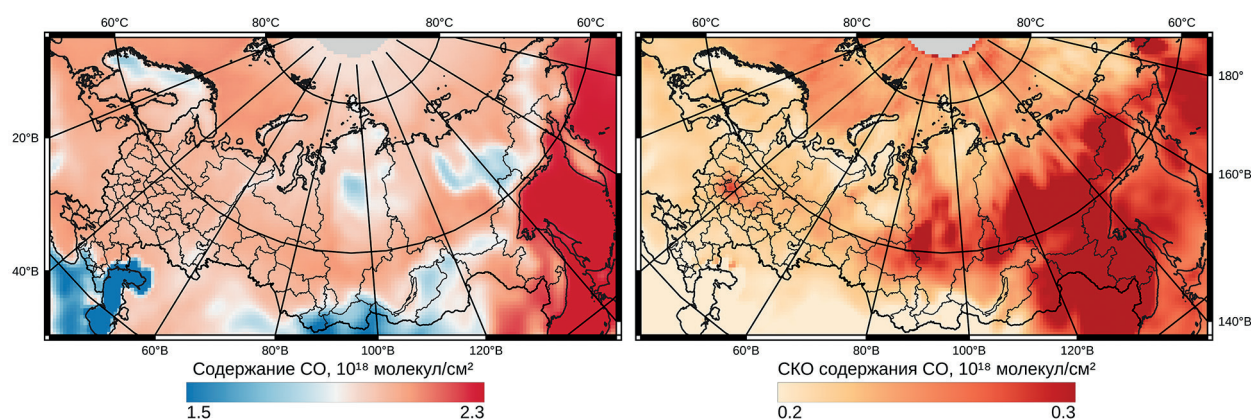


Рис. 5. Среднемноголетнее содержание и СКО CO с 2008 по 2023 г.

Рисунок 6 с распределением формальдегида демонстрирует относительно ровное распределение экотоксиканта в зависимости от широты местности: в южных регионах наблюдается высокая концентрация, в северных — низкая. Прослеживается зависимость концентрации формальдегида от наличия промышленности в регионе. Карта СКО не показывает каких-либо особенностей, что означает отсутствие высокоинтенсивных источников формальдегида на земной поверхности.

В качестве примера трендов экотоксикантов приведём среднегодовые значения содержания NO_2 и SO_2 для Москвы (рис. 7).

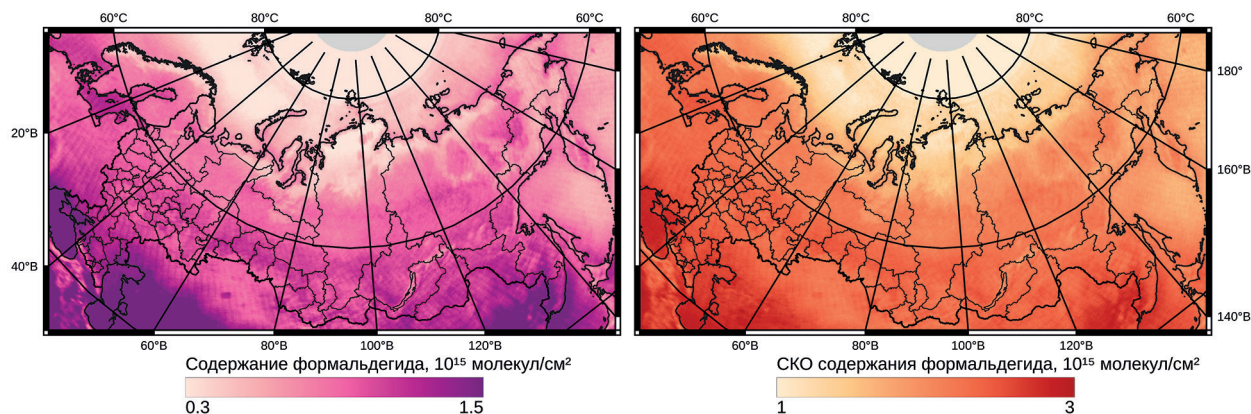


Рис. 6. Среднегодовое содержание и СКО формальдегида с 2005 по 2021 г.

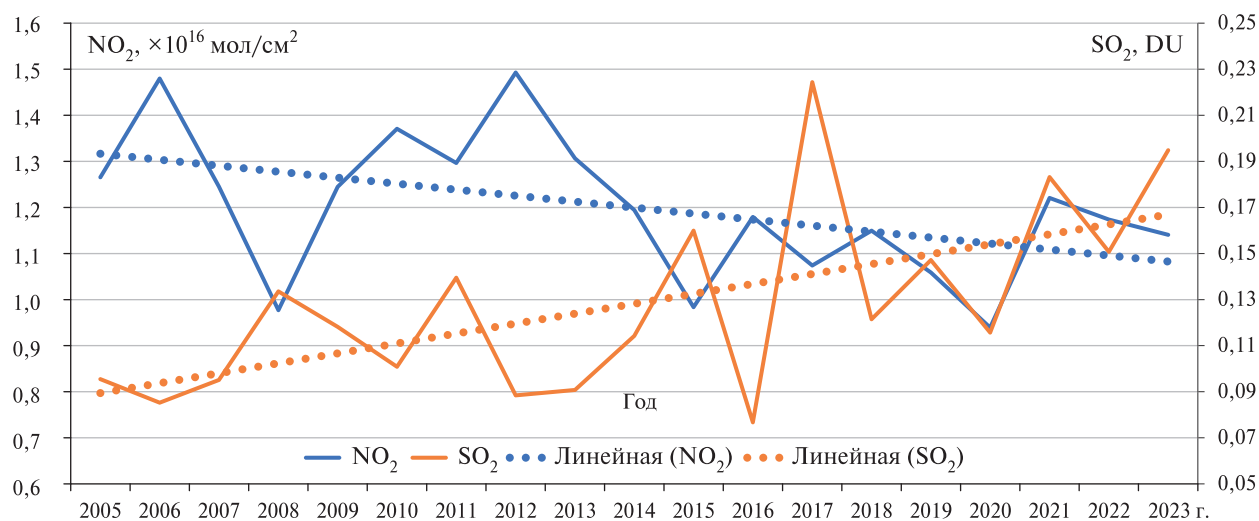


Рис. 7. Тренды среднегодового содержания NO_2 и SO_2 для г. Москвы с 2005 по 2023 г.

На рис. 7 видно уменьшение содержания NO_2 со временем, что отражается в линейном тренде, тогда как содержание SO_2 растёт, что и демонстрирует соответствующий тренд. Заметим здесь, что оба эти тренда значимы с вероятностью не менее чем $p = 0,1$ (90 %). Следует заметить, что рост концентрации SO_2 в Москве и прилегающих регионах на фоне падения концентрации NO_2 является необычным процессом, авторы планируют отдельную публикацию по этому вопросу.

Линейные тренды концентрации экотоксикантов вычислены по среднегодовым значениям согласно интервалам времени, приведённым в табл. 2. Тренды были разделены на четыре класса: отрицательные и положительные, значимые с вероятностью не менее чем $p = 0,1$ (90 %) и незначимые. На рис. 8 (см. с. 341) показано распределение этих классов трендов по измеряемым параметрам.

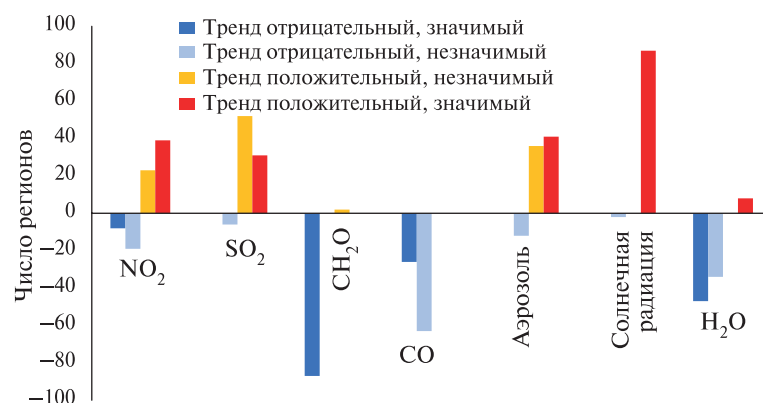


Рис. 8. Распределение трендов измеряемых параметров в зависимости от их знака и значимости

На нём хорошо видно, что исследуемые параметры имеют различные тренды во времени. Тренды NO₂, SO₂ и аэрозоля для большинства регионов положительные и многие из них значимые. Тренды CH₂O и CO — отрицательные. Солнечная радиация увеличивается практически во всех регионах, и этот рост статистически значим. Содержание водяного пара в атмосфере для большинства субъектов Федерации имеет отрицательный тренд.

Анализ многолетних трендов содержания NO₂ (рис. 9) указывает на снижение концентрации газа главным образом в крупных городских и промышленных агломерациях: Москва и Санкт-Петербург, Московская и Ленинградская области. Отмечается уменьшение концентрации и в других крупных городах и промышленных центрах. В Поволжье сформировалась группа регионов, где отмечен рост среднееголетнего содержания NO₂: республики Татарстан, Башкортостан, Марий Эл, Мордовия, Удмуртская и Чувашская республики, Нижегородская, Ульяновская области.

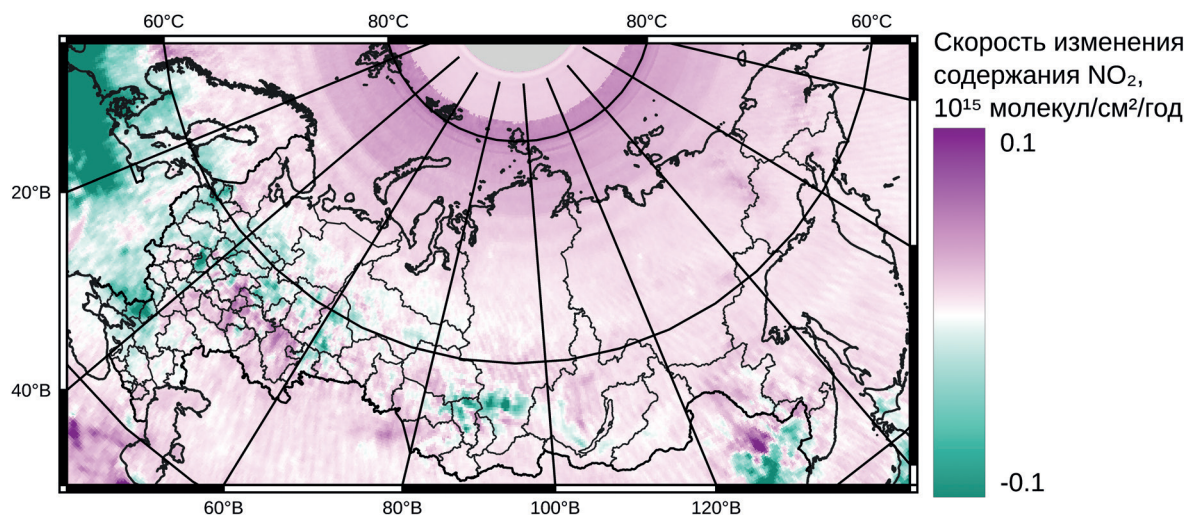


Рис. 9. Тренд содержания NO₂ с 2005 по 2023 г.

Тренд концентрации диоксида серы (рис. 10) (см. с. 342) похож на тренд диоксида азота — отчётливо фиксируется снижение концентрации в промышленных районах, таких как Норильск, Челябинская и Липецкая области, Донбасс. В большинстве регионов отмечается рост содержания газа в атмосфере. Наибольший рост отмечен в Центральном федеральном округе: Москве и Московской области, Владимирской, Калужской, Ивановской областях. Области положительных и отрицательных трендов на Камчатке связаны с особенностями газовых шлейфов вулканов.

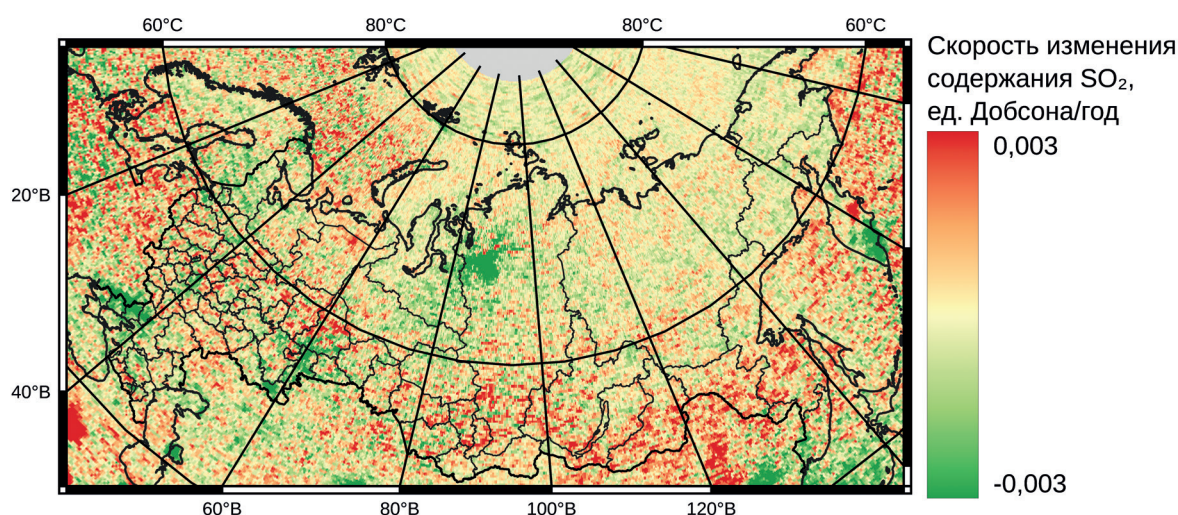


Рис. 10. Тренд содержания SO_2 с 2005 по 2023 г.

Высокие положительные тренды содержания аэрозоля фиксируются главным образом в таёжной и тундровой зонах (рис. 11). Максимальный прирост содержания аэрозоля зарегистрирован на Чукотке и Якутии, Магаданской области, Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах, Мурманской области и Карелии, что можно объяснить увеличением выброса аэрозоля в атмосферу от природных пожаров (Котельников и др., 2023). Отрицательный тренд отмечен в Смоленской и Калужской, Тульской, Брянской областях и Москве.

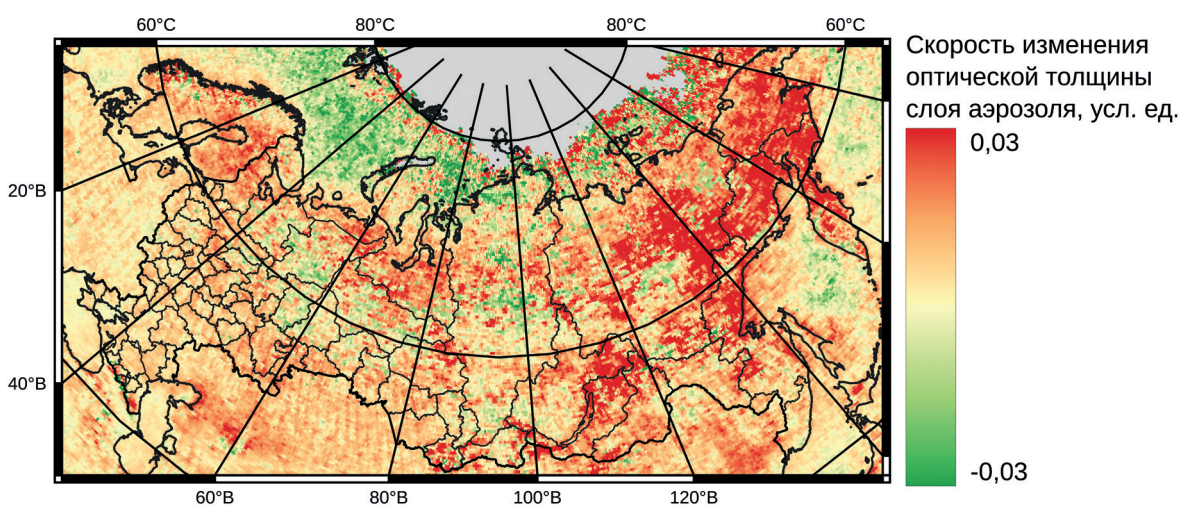


Рис. 11. Тренд содержания аэрозоля с 2005 по 2023 г.

Концентрация CO уменьшается во всех регионах России (рис. 12, см. с. 343). Наиболее сильное понижение отмечено в Центральной России: Липецкая область, Чувашская Республика, Тульская и Орловская, Белгородская и Курская области, а также практически все регионы Дальнего Востока. Небольшие повышения концентрации наблюдаются в некоторых районах Красноярского края, Якутии и Иркутской области.

Содержание формальдегида увеличивается в таёжной и тундровых зонах: от Магаданской области и Якутии до Карелии и Ленинградской области (рис. 13, см. с. 343). Снижение концентрации происходит в южных регионах: Дагестане, Краснодарском крае, Крыму, а на Дальнем Востоке — в Приморском крае.

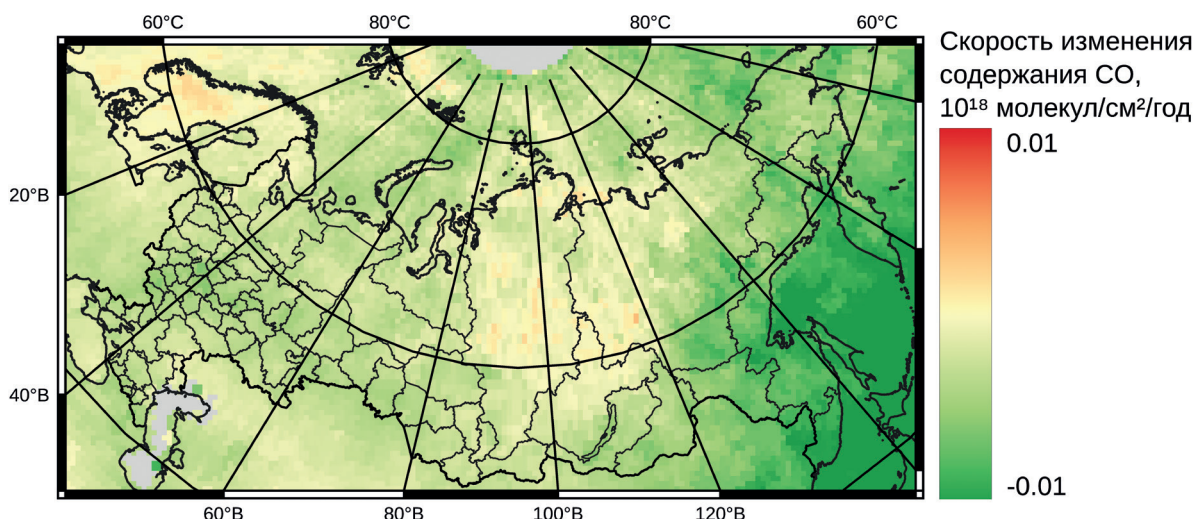


Рис. 12. Тренд содержания CO с 2008 по 2023 г.

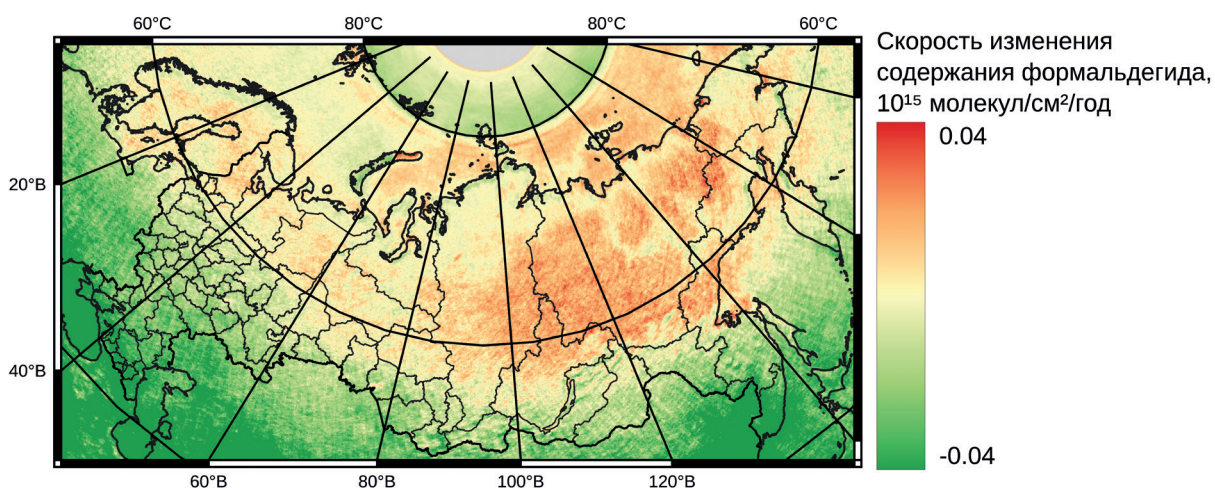


Рис. 13. Тренд содержания формальдегида с 2005 по 2021 г.

Инсоляция увеличивается во всех регионах России, кроме городов Москвы и Севастополя. Наибольший рост солнечного излучения отмечен в Сибири: Забайкальский край, Новосибирская область, Алтайский край, Кемеровская область.

Рост концентрации водяного пара отмечен в Сахалинской области, Приморском и Хабаровском краях, а также в Ямало-Ненецком автономном округе, Красноярском крае и Якутии. Уменьшение концентрации зафиксировано главным образом в Поволжье: Костромская, Кировская, Нижегородская, Самарская области, Чувашская и Удмуртская республики, республики Татарстан и Марий Эл.

Обсуждение результатов

Анализируя спутниковые данные о содержании экотоксикантов в воздухе, можно сделать несколько предположений об источниках загрязнения. На многолетних данных отчётливо прослеживается связь концентрации диоксидов азота и серы с городскими и промышленными агломерациями. Об этом же говорит относительно высокий коэффициент корреляции (0,49) между концентрацией диоксидов азота и серы. При этом диоксид серы имеет ещё один мощный природный источник — вулканические процессы. Столь же отчётливо картина отрицательных трендов концентрации диоксидов азота и серы в большинстве про-

мышленных агломераций: Норильск, Урал. В крупных городах прослеживается рост концентрации диоксида серы. Так, по спутниковым наблюдениям среднегодовая концентрация диоксида серы в Москве увеличилась с 0,09 до 0,19 DU в период с 2005 по 2023 г. Содержание формальдегида в атмосфере вероятно также связано с антропогенными эмиссиями с территорий городских агломераций, о чём говорит относительно высокий коэффициент корреляции (0,45) с диоксидом азота. Однако на изображениях с пространственным распределением общего содержания формальдегида городские и промышленные агломерации не выделяются так отчётливо, как на изображениях для диоксида азота. Анализ изображений с пространственным распределением аэрозоля и СО не выявил связи с городскими и промышленными агломерациями. О том, что городские и промышленные агломерации являются основным источником экотоксикантов в атмосфере, было известно и ранее. Масштабные исследования атмосферы городов проводятся силами Росгидромета, муниципальными властями, организациями РАН (Доклад..., 2024; Состояние..., 2024; Elansky et al., 2016). В связи с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха городов был инициирован федеральный проект «Чистый воздух» национального проекта «Экология», который направлен на улучшение экологической обстановки и снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. В проекте участвуют 12 крупных промышленных центров: Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец и Чита. Принимаемые меры должны обеспечить кардинальное снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха, а также снижение выбросов в два раза к 2030 г.

Лесные пожары можно рассматривать как второй мощный источник аэротоксикантов. Изображения с пространственным распределением содержания аэрозоля и СО указывают на то, что максимальная концентрация загрязнителей наблюдается в лесных и таёжных регионах с малой плотностью населения и схожа с картами оценки горимости лесов. Моделирование процессов горения и распространения примесей в атмосфере, наземные и спутниковые исследования эмиссии от природных пожаров показали, что они являются важнейшими источниками аэрозолей различного размера, СО и СО₂ (Griffin et al., 2023; Nurrohman et al., 2024; Vasilakopoulou et al., 2023).

Относительно многолетних трендов содержания экотоксикантов, а также водяного пара и солнечного излучения можно сделать некоторые обобщения. Для большинства регионов характерен рост содержания диоксида азота и серы, аэрозоля и солнечной радиации. При этом в регионах с высокой концентрацией диоксида азота многолетний тренд — отрицательный. С другой стороны, отрицательный тренд наблюдается для формальдегида, СО и водяного пара в подавляющем числе регионов. Интересно отметить высокие отрицательные значения коэффициента корреляции в парах аэрозоль—солнечная радиация, аэрозоль—содержание водяного пара, при этом многолетние тренды содержания аэрозоля и потока солнечной радиации положительны для большинства регионов, а тренды содержания водяного пара — отрицательные. Отрицательная связь солнечной радиации с концентрацией аэрозоля объясняется поглощением радиации на частицах аэрозоля. Отрицательная зависимость концентрации аэрозоля и водяного пара не вполне понятна. В дальнейшем планируется проанализировать физико-химические процессы взаимодействия аэротоксикантов — малых газовых компонентов атмосферы — и аэрозоля, а также солнечного излучения и водяного пара.

Тренды содержания экотоксикантов в России хорошо согласуются с глобальными тенденциями. Так, отмечается значимый рост концентрации NO₂ в глобальном масштабе, за исключением территорий США и Европы. В городах США и Европы отмечен отрицательный тренд концентрации NO₂ (Amritha et al., 2024), тогда как в городах развивающихся стран концентрации газа растут. Схожая картина наблюдается с глобальным распределением SO₂ (Krotkov et al., 2016). Отмечается падение концентрации в Европе, США, а с 2011 г. и в Китае, тогда как в Индии и на Ближнем Востоке продолжается рост концентрации аэротоксиканта. Глобальные тренды аэрозоля в атмосфере показывают устойчивое снижение концентрации, за исключением Индии (Gupta et al., 2023). Современное положение с трендами аэротоксикантов связывается с процессами автомобилизации, перехода на новые экологиче-

ские стандарты, внедрением электромобилей, а также с прекращением/развитием угольной электрогенерации.

В работе рассмотрены многолетние данные о содержании экотоксикантов в атмосфере России по спутниковым данным. Сезонный аспект требует отдельного исследования и затрагивает как особенности спутниковой съёмки территории России, так и климатическую зависимость концентрации аэротоксикантов.

Использованное в работе деление территории по субъектам Федерации не всегда позволяет адекватно оценить экологическую ситуацию в регионе. Это особенно хорошо заметно на примере Красноярского края, где находится крупнейший источник SO_2 — Норильский горно-металлургический комбинат. Учитывая огромную территорию края, средняя концентрация получается на приемлемом уровне. По-видимому, для таких субъектов Федерации, как Красноярский край и Республика Саха (Якутия), следует переходить на уровень районов. Вместе с тем деление территории по субъектам Федерации позволит в будущем провести оценки экспозиции экотоксикантов на 1 км^2 территории и одного жителя.

Заключение

В результате исследований были проанализированы многолетние данные о содержании диоксидов азота и серы, аэрозоля, формальдегида, угарного газа, а также водяного пара и интенсивности солнечного излучения в атмосфере 89 субъектов Российской Федерации. Вычислены средние многолетние, минимальные и максимальные значения для каждого региона, построена корреляционная матрица средних многолетних наблюдаемых параметров, определена значимость коэффициентов корреляции. Построено статистическое распределение концентрации аэротоксикантов. Вычислены её тренды и определена их статистическая значимость.

В результате обработки изображений построены карты средних многолетних значений и СКО концентрации аэротоксикантов на все регионы России и сопредельные территории. Построены карты трендов концентрации аэротоксикантов.

Анализ данных показал явную связь высокой концентрации диоксидов азота и серы с городскими и промышленными агломерациями. Высокая концентрация аэрозоля и угарного газа скорее всего связана с эмиссией от лесных пожаров.

Для большинства субъектов отмечен рост содержания диоксида азота и серы, аэрозоля и солнечной радиации, хотя в регионах с высокой концентрацией диоксида азота, таких как Москва, Санкт-Петербург, Московская и Ленинградская области, наблюдается её снижение. В большинстве регионов отмечается уменьшение среднегодовых значений формальдегида, угарного газа и водяного пара.

Возможности спутниковой съёмки для определения концентрации аэротоксикантов непрерывно улучшаются, растёт доступность материалов. Всё это делает спутниковые наблюдения в сочетании с наземными измерениями полезным инструментом для анализа экологической ситуации на больших территориях.

Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 24-27-00156 «Пространственно-временные закономерности уровня загрязнения воздуха регионов Российской Федерации на основе спутниковых наблюдений», <https://rscf.ru/project/24-27-00156/>.

Литература

1. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2023 году / под ред. А. В. Германа, И. А. Серебрицкого. СПб., 2024. 221 с.
2. Котельников Р. В., Луян Е. А., Балашов И. В. Предварительный анализ горимости лесов Российской Федерации в пожароопасном сезоне 2023 года по данным дистанционного мониторинга

- // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 327–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-327-334.
3. Морозова А. Э., Сизов О. С., Елагин П. О., Агзамов Н. А. Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных ТРОПОМ (Sentinel-5P) за 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 23–39. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
 4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект государственного доклада. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд эколог. мониторинга и междунаро. технолог. сотрудничества, 2024. 707 с.
 5. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2023 г. СПб.: Росгидромет, ФГБУ «ГГО им. Воейкова», 2024. 265 с.
 6. Тронин А. А., Седеева М. С., Неробелов Г. М., Васильев М. П. Мониторинг содержания диоксида азота в атмосфере городов Европы и России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 287–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297.
 7. Amritha S., Varikoden H., Patel V. K. et al. Global, regional and city scale changes in atmospheric NO₂ with environmental laws and policies // Sustainable Cities and Society. V. 112. 2024. Article 105617. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105617>.
 8. Boesch H., Potts D., Marais E. A. Using Sentinel-5P and models to analyse air quality changes since the Coronavirus Outbreak // American Geophysical Union. Fall Meeting. 2020. Article A095-0020. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AGUFMA095.0020B/abstract>.
 9. Borsdorff T., van de Brugh J., Hu H. et al. Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage // Atmospheric Measurement Techniques. 2018. V. 11. P. 5507–5518. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>.
 10. Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L. et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. V. 9. P. 6041–6054. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>.
 11. Elansky N. F., Lavrova O. V., Skorokhod A. I. et al. Trace gases in the atmosphere over Russian cities // Atmospheric Environment. 2016. V. 143. P. 108–119. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.046.
 12. Griffin D., Chen J., Anderson K. et al. Towards an improved understanding of wildfire CO emissions: a satellite remote-sensing perspective // <https://egusphere.copernicus.org/>. Preprint egusphere-2023-649. 2023. 37 p. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-649>.
 13. Gupta G., Venkat Ratnam M., Madhavan B. L., Jayaraman A. Global trends in the aerosol optical, physical, and morphological properties obtained using multi-sensor measurements // Atmospheric Environment. 2023. V. 295. Article 119569. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119569>.
 14. Kahn B. H., Irion F. W., Dang V. T. The Atmospheric Infrared Sounder version 6 cloud products // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. No. 1. P. 399–426. DOI: 10.5194/acp-14-399-2014.
 15. Krotkov N. A., McLinden C. A., Li C. et al. Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. P. 4605–4629. <https://doi.org/10.5194/acp-16-4605-2016>.
 16. Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R. et al. The Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. P. 1093–1101. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.
 17. Nurrohman R. K., Kato T., Ninomiya H. et al. Future projections of Siberian wildfire and aerosol emissions // Biogeosciences. 2024. V. 21. Iss. 18. P. 4195–4227. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4195-2024>.
 18. OMI algorithm theoretical basis document. V. IV. OMI trace gas algorithms. Cambridge, MA, USA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2002. 78 p.
 19. Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide / OMI Team. 2009. 64 p. <https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2017-487/acp-2017-487.pdf>.
 20. Pommier M., Law K. S., Clerbaux C. et al. IASI carbon monoxide validation over the Arctic during POLARCAT spring and summer campaigns // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. P. 10655–10678. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10655-2010>.
 21. Vasilakopoulou C. N., Matrali A., Skyllakou K. et al. Rapid transformation of wildfire emissions to harmful background aerosol // npj Climate and Atmospheric Science. 2023. V. 6. Article 218. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00544-7>.

Analysis of long-term data on the content of ecotoxics in the atmosphere of the Russian Federation based on satellite data

A. A. Tronin¹, M. P. Vasiliev¹, A. V. Kiselev¹, G. M. Nerobelov^{1,2,3}

¹ Saint Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197110, Russia

E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

² Saint Petersburg University, Saint Petersburg 199034, Russia

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia

Aerotoxics — air pollutants (aerosols, nitrogen and sulfur dioxides, formaldehyde and carbon monoxide) have a significant impact on the health of people and ecosystems. Analysis of ecotoxin content is important for understanding processes in the surface layer of the atmosphere and monitoring air quality. In recent decades, a system of remote methods for obtaining information on atmospheric pollution has been developed, based on Earth remote sensing devices. Based on satellite observations, the study analyzed long-term data on the content of aerotoxics, as well as water vapor and the intensity of solar radiation in the atmosphere of 89 subjects of the Russian Federation. Statistical processing of the data was carried out. Trends in the concentrations of aerotoxics were calculated and their statistical significance was determined. As a result of image processing, maps of average long-term values and standard deviations of aerotoxin concentrations, as well as maps of concentration trends for all regions of Russia and adjacent territories, were compiled. Data analysis showed a clear connection between high concentrations of nitrogen and sulfur dioxides and urban and industrial agglomerations. High concentrations of aerosol and carbon monoxide are most likely related to emissions from forest fires. For most regions, an increase in nitrogen dioxide and sulfur dioxide, aerosol and solar radiation was noted, although in regions with high concentrations of nitrogen dioxide such as Moscow, Saint Petersburg, Moscow and Leningrad regions, a decrease in concentrations was observed. Decreases in average annual values of formaldehyde, carbon monoxide, and water vapor were observed for most regions. Satellite imaging capabilities for determining airborne toxicant concentrations are continually improving, and the availability of materials is growing. All this makes satellite observations, in combination with ground measurements, a useful tool for analyzing the environmental situation over large areas.

Keywords: aerotoxin, subject of the Russian Federation, remote sensing of the Earth

Accepted: 24.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-333-348

References

1. *Doklad ob ehkologicheskoi situatsii v Sankt-Peterburge v 2023 godu* (Report on the environmental situation in Saint Petersburg in 2023), A. V. German, I. A. Serebriksky (eds.), Saint Petersburg, 2024, 221 p. (in Russian).
2. Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Preliminary analysis of forest fires in the Russian Federation in the 2023 fire season based on remote monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 327–334 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-327-334.
3. Morozova A. E., Sizov O. S., Elagin P. O., Agzamov N. A., Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019–2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 23–29 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
4. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiyskoi Federatsii v 2023 godu* (On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2023), Draft State report, Moscow: Minprirody Rossii; OOO “Intellectual’naya analitika”; FGBU “Direktsiya NTP”; Fond ehkologicheskogo monitoringa i mezhdunarodnogo tekhnologicheskogo sotrudnichestva, 2024, 707 p. (in Russian).
5. *Sostoyanie zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2023 g.* (State of air pollution in cities on the territory of Russia for 2023), Saint Petersburg: Roshydromet, FGBU “GGO im. Voeikova”, 2024, 265 p. (in Russian).

6. Tronin A. A., Sedeeva M. S., Nerobellov G. M., Vasiliev M. P., Monitoring of nitrogen dioxide content in the atmosphere of cities in Europe and Russia using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 1, pp. 287–297 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297.
7. Amritha S., Varikoden H., Patel V. K. et al., Global, regional and city scale changes in atmospheric NO₂ with environmental laws and policies, *Sustainable Cities and Society*, V. 112, 2024, Article 105617, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105617>.
8. Boesch H., Potts D., Marais E. A., Using Sentinel-5P and models to analyse air quality changes since the Coronavirus Outbreak, *American Geophysical Union. Fall Meeting*, 2020, Article A095-0020, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AGUFMA095.0020B/abstract>.
9. Borsdorff T., van de Brugh J., Hu H. et al., Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, V. 11, pp. 5507–5518, <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>.
10. Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L. et al., Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, V. 9, pp. 6041–6054, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>.
11. Elansky N. F., Lavrova O. V., Skorokhod A. I. et al., Trace gases in the atmosphere over Russian cities, *Atmospheric Environment*, 2016, V. 143, pp. 108–119, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.046.
12. Griffin D., Chen J., Anderson K. et al., Towards an improved understanding of wildfire CO emissions: a satellite remote-sensing perspective, <https://egusphere.copernicus.org/>, Preprint egusphere-2023-649, 2023, 37 p., <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-649>.
13. Gupta G., Venkat Ratnam M., Madhavan B. L., Jayaraman A., Global trends in the aerosol optical, physical, and morphological properties obtained using multi-sensor measurements, *Atmospheric Environment*, 2023, V. 295, Article 119569, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119569>.
14. Kahn B. H., Irion F. W., Dang V. T., The Atmospheric Infrared Sounder version 6 cloud products, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, V. 14, No. 1, pp. 399–426, DOI: 10.5194/acp-14-399-2014.
15. Krotkov N. A., McLinden C. A., Li C. et al., Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, V. 16, pp. 4605–4629, <https://doi.org/10.5194/acp-16-4605-2016>.
16. Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R. et al., The Ozone Monitoring Instrument, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, V. 44, pp. 1093–1101, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.
17. Nurrohman R. K., Kato T., Ninomiya H. et al., Future projections of Siberian wildfire and aerosol emissions, *Biogeosciences*, 2024, V. 21, Iss. 18, pp. 4195–4227, <https://doi.org/10.5194/bg-21-4195-2024>.
18. *OMI algorithm theoretical basis document. V. IV. OMI trace gas algorithms*, Cambridge, MA, USA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2002, 78 p.
19. *Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide*, OMI Team, 2009, 64 p., https://web.corral.tacc.utexas.edu/CSR/Public/OMI/Ozone/README.OMI_DUG.pdf.
20. Pommier M., Law K. S., Clerbaux C. et al., IASI carbon monoxide validation over the Arctic during POLARCAT spring and summer campaigns, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, V. 10, pp. 10655–10678, <https://doi.org/10.5194/acp-10-10655-2010>.
21. Vasilakopoulou C. N., Matrali A., Skyllakou K. et al., Rapid transformation of wildfire emissions to harmful background aerosol, *npj Climate and Atmospheric Science*, 2023, V. 6, Article 218, <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00544-7>.