

Районирование регионов Российской Федерации по уровню загрязнения воздуха на основе результатов спутниковых наблюдений

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

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: a.a.tronin@gmail.com

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

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

Результаты анализа пространственно-временного распределения концентрации экотоксикантов в атмосфере субъектов Российской Федерации получены на основе данных спутниковых наблюдений за концентрацией диоксидов азота и серы, формальдегида, оксида углерода и аэрозоля в период с 2004 по 2023 г. В итоге проведённого исследования были выявлены субъекты Российской Федерации, характеризующиеся различными значениями концентрации загрязняющих веществ, и выполнено ранжирование регионов в соответствии с этими показателями с учётом классов опасности экотоксикантов. С использованием кластерного анализа были также установлены территории со сходной структурой загрязнения воздуха различными экотоксикантами. Оценка трендов среднегодовой концентрации экотоксикантов позволила определить регионы, в которых отмечаются статистически значимые изменения концентрации различных загрязняющих веществ в нижней тропосфере. Полученные данные могут быть полезны для анализа экологической ситуации на больших территориях и разработки предложений по её улучшению в конкретных субъектах с учётом выявления наиболее негативных факторов, определяющих место субъекта в общем рейтинге.

Ключевые слова: концентрация экотоксикантов, диоксид азота, диоксид серы, формальдегид, оксид углерода, аэрозоль, ранжирование субъектов Российской Федерации, районирование территории

Одобрена к печати: 06.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-398-408

Введение

В Российской Федерации, как и во всём мире, по-прежнему достаточно остро стоит проблема аэротехногенного загрязнения. Поэтому чрезвычайно актуальным направлением исследований остаётся комплексный анализ качества воздуха субъектов Российской Федерации по уровню его загрязнения. Однако для решения этой задачи часто не хватает объективных и надёжных средств наблюдений, позволяющих проводить регулярные измерения экотоксикантов на обширных территориях. Эту проблему помогают решать спутниковые дистанционные методы анализа содержания различных газов в атмосфере. Сегодня существует ряд спутниковых систем, направленных на регулярный мониторинг содержания газовых и аэрозольных загрязнителей в нижней тропосфере. Анализ характеристик таких систем представлен, например, в работах (Бриль и др., 2023; Тронин и др., 2024; Zhang et al., 2023). При наличии надёжных данных по уровню загрязнения воздуха в выделенных слоях (в тропосфере, стратосфере, во всём атмосферном столбе), полученных на основе спутниковых наблюдений, можно определять размеры конкретных территорий, подвергшихся загрязнению экотоксикантами в каждом субъекте страны, проводить районирование регионов Российской Федерации по комплексу показателей и оценивать динамику изменения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере субъектов России.

Вопросам районирования территории страны по степени экологической безопасности посвящены исследования, проводимые Институтом глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля (ИГКЭ) (<http://www.igce.ru/kpzpos/>), Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (ГГО) (<http://voeikovmgo.ru/index.php/sub-ekty-rf-i-chislo-zhitelej-v-nikh-ispytyvayushchikh-vozdjstvie-vysokogo-i-ochen-vysokogo-zagryazneniya-vozdukha>), Санкт-Петербургским научно-исследовательским центром экологической безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН) (<http://ecosafety-spb.ru/>), а также российской консалтинговой компанией «КБ Стрелка», оказывающей услуги в области городского развития (<https://www.atomic-energy.ru/news/2023/02/01/132421>). Методы и результаты ранжирования регионов России по комплексу параметров антропогенной нагрузки на окружающую среду рассматриваются в работах ((Бобылёв и др., 2020; Васильев, Тронин, 2021; Тронин, 2019; Черногаева и др., 2019) и др.). В этих исследованиях анализировались обширные массивы данных, характеризующих как антропогенное воздействие на атмосферный воздух и водную среду, так и обращение с отходами производства и потребления, площадь территорий, подвергшихся антропогенному воздействию, и т. д.

В представленной работе более подробно рассматривается уровень загрязнения приземного слоя атмосферы, так как атмосферный воздух является важнейшим компонентом окружающей среды, определяющим здоровье населения. На основе данных спутниковых наблюдений за концентрацией диоксидов азота и серы, формальдегида, оксида углерода и аэрозоля в период с 2005 по 2023 г. было выполнено ранжирование регионов России по комплексному показателю загрязнения воздуха с учётом класса опасности указанных экотоксикантов.

С использованием кластерного анализа были также определены группы субъектов России со сходной структурой загрязнения воздуха различными веществами. Оценка трендов среднегодовой концентрации экотоксикантов позволила определить регионы, в которых отмечаются статистически значимые изменения концентрации различных загрязняющих веществ в нижней тропосфере. Полученные пространственные и временные оценки качества воздуха на региональном уровне позволяют включить информацию о них в процессы принятия решений при разработке стратегии развития субъектов страны и определить оптимальные пути управления экологическими рисками.

Данные и методы

В исследовании использованы данные о содержании SO_2 , NO_2 , HCHO , CO и аэрозоля на основе измерений спутниковых систем Aura (спектрометр OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument)), MetOp (инструмент IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)), Terra и Aqua (приборы MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и AIRS (*англ.* Atmospheric Infrared Sounder)) за 2004–2023 гг. Наборы данных были получены с веб-сервисов, находящихся в открытом доступе. В работах (Лупян и др., 2019; Тронин и др., 2024; Dang et al., 2023) и др. проведён анализ таких сервисов и баз данных, определены их преимущества и недостатки, приведены примеры возможного практического применения таких данных. Указанные источники информации привлекались для создания базы данных о среднем содержании основных экотоксикантов в нижней тропосфере всех субъектов Российской Федерации. Имеющиеся в базе значения среднегодовой концентрации экотоксикантов (Тронин и др., 2024) стали основой для ранжирования субъектов России по уровню загрязнения атмосферного воздуха и районирования территории страны в соответствии со структурой загрязнения воздуха различными веществами. Надо отметить, что в данной работе используются значения концентрации экотоксикантов, осреднённые по территории субъектов. Поэтому в результате получается сглаженная картина уровня загрязнения воздуха по территории страны. Тем не менее такие данные могут быть полезны для принятия решений по улучшению экологического состояния на уровне субъекта.

Для ранжирования регионов России по величине концентрации атмосферных экотоксикантов было необходимо определить комплексный показатель загрязнения воздуха

всеми анализируемыми загрязняющими веществами. С этой целью исходные данные были переведены в относительные единицы в диапазоне от 0 до 1 с использованием формулы $X_{\text{норм}} = (X_{\text{исх}} - X_{\text{мин}}) / (X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}})$ для того, чтобы можно было объединять показатели с разными единицами измерения. Затем полученные значения были просуммированы с разными весами с учётом классов опасности рассматриваемых экотоксикантов для здоровья человека (Санитарные правила и нормы СанПин 1.2.3685-21 (Постановление..., 2021)). В соответствии с этим документом выделяются четыре класса опасности вредных веществ: 1-й — чрезвычайно опасные, 2-й — высокоопасные, 3-й — умеренно опасные и 4-й — малоопасные. Эти классы определены исходя из смертельной концентрации веществ в воздухе. Из числа рассматриваемых экотоксикантов к 2-му классу относится формальдегид; к 3-му классу — диоксид азота, диоксид серы, взвешенные вещества (пыль); к 4-му классу — оксид углерода.

При определении весов, с которыми суммируются слагаемые в каком-либо комплексном показателе, могут быть использованы различные подходы (экспертные оценки, корреляционный анализ, факторный анализ). В данном случае, так как рассматриваемые вещества относятся к трём различным классам, характеризующим разную степень опасности для здоровья человека, данные по формальдегиду (высокоопасному веществу) для каждого субъекта суммировались с весом 0,3; по диоксиду азота, диоксиду серы и аэрозолю (умеренно опасным веществам) — с весом 0,2; по оксиду углерода (малоопасному веществу) — с весом 0,1. Веса были выбраны с таким расчётом, чтобы их сумма равнялась 1. Подход к ранжированию территорий по комплексу показателей, используемый в настоящем исследовании, подробно рассмотрен, например, в работе (Энциклопедия..., 2005), а также в публикации (World..., 2011).

Районирование территории страны в соответствии со структурой загрязнения воздуха экотоксикантами проводилось с помощью кластерного анализа. В качестве оценки расстояния в пространстве признаков между отдельными кластерами использовалось так называемое *манхэттенское расстояние* (Деза, Деза, 2008). Манхэттенское расстояние является одной из количественных мер близости признаков при выполнении древовидной кластеризации и рассчитывается как сумма абсолютных разностей между значениями по каждому параметру в многомерном пространстве признаков. Например, манхэттенское расстояние L между двумя точками с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) в двумерном пространстве рассчитывается по формуле $L = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$, где $|x_1 - x_2|$ — абсолютное значение разности координат точек по оси x ; $|y_1 - y_2|$ — абсолютное значение разности координат точек по оси y .

Данный подход позволяет выявить группы областей, внутри которых наблюдаются наименьшие различия в структуре показателей внутри кластеров и наибольшие — между кластерами. В результате появляется возможность обнаружить кластеры (ветви) разного масштаба и интерпретировать их.

Статистическая значимость наблюдаемых трендов среднегодовой концентрации экотоксикантов определялась по критерию Фишера на 90%-м и 95%-м уровне.

Результаты и их обсуждение

В результате ранжирования субъектов по величине комплексного показателя загрязнения воздуха было выделено пять групп субъектов — от субъектов с самой высокой суммарной среднегодовой концентрацией экотоксикантов (0,81–1,00) до субъектов с самой низкой концентрацией (0,00–0,20) (рис. 1, см. с. 401).

Самая высокая степень загрязнения аэротоксикантами характерна, как и следовало ожидать, для Москвы и Московской области с их чрезвычайно интенсивными транспортными потоками, а также для Свердловской области с высокоразвитыми химической и металлургической отраслями промышленности. Второе место в рейтинге занимают промышленно развитые субъекты центра европейской территории России (ЕТР) и юга Западной Сибири.

Наиболее низкие значения комплексного показателя загрязнения воздуха отмечаются в регионах на севере (например, Ненецкий и Чукотский АО) и юге страны (Северо-Кавказский регион, Республика Тыва), для которых характерна относительно невысокая

плотность населения, менее напряжённое движение транспорта и отсутствие высокоразвитой промышленности.

Однако ранжирование субъектов России по значению комплексного показателя загрязнения воздуха, представленное на *рис. 1*, отражает только суммарную величину концентрации пяти рассматриваемых аэротоксикантов, но не раскрывает соотношение концентрации отдельных загрязнителей, характерное для конкретных субъектов. Эта задача была решена с использованием кластерного анализа. С помощью метрики расстояния в пространстве признаков (манхэттенского расстояния) выделены группы субъектов, относительно однородных по структуре загрязнения воздуха. В результате построено иерархическое дерево, где по вертикали откладывается расстояние в пространстве признаков между кластерами, т. е. группами субъектов различного масштаба (*рис. 2*, см. с. 402).

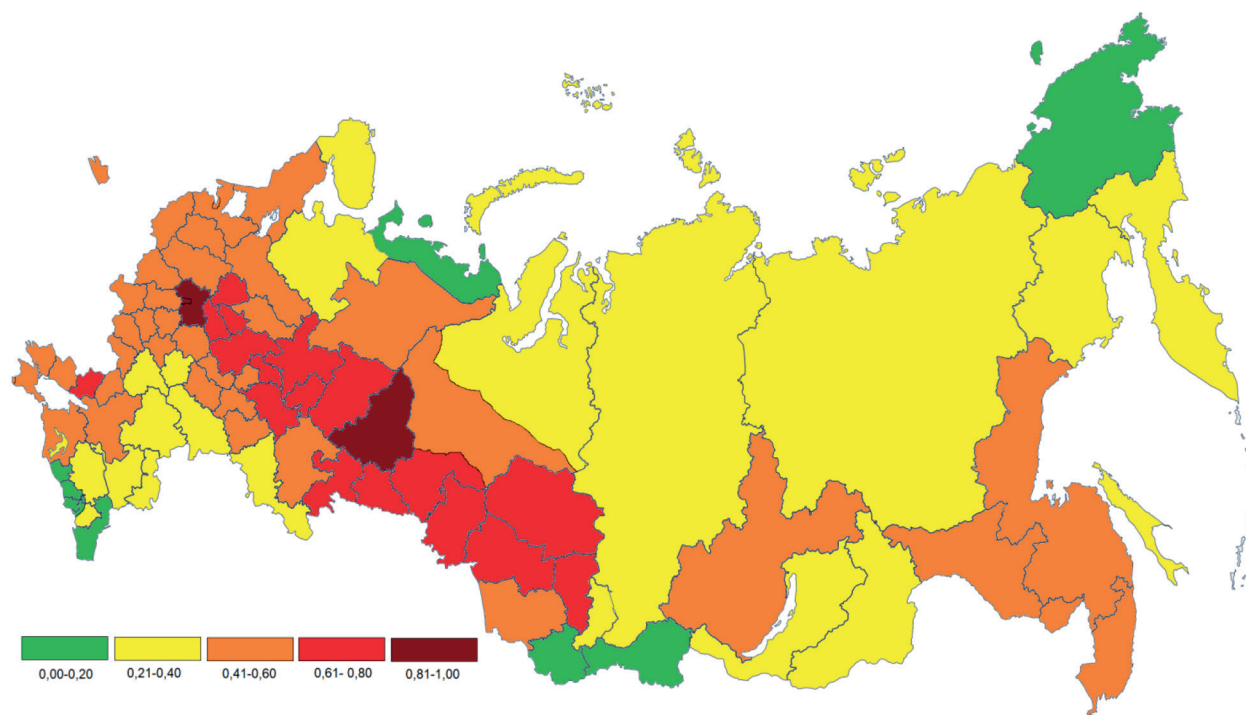


Рис. 1. Ранжирование субъектов Российской Федерации по величине комплексного показателя загрязнения воздуха (в относительных единицах)

При выделении кластеров было определено, что расстоянию примерно от 5 до 9 единиц соответствуют 7 районов, относительно однородных по структуре загрязнения и имеющих хорошо выраженную пространственную привязку (*рис. 3*, см. с. 403):

- 1 — юг ЕТР, преимущественно равнинная территория;
- 2 — юг Уральского и Сибирского ФО (преимущественно горная территория), Северо-Кавказский ФО, низовья Волги;
- 3 — север и центр Дальневосточного и Сибирского ФО, северная часть Северо-Западного ФО;
- 4 — крупные городские агломерации, запад ЕТР;
- 5 — Поволжье и юг Дальневосточного и Сибирского ФО;
- 6 — Урал, Верхнее Поволжье;
- 7 — Центр ЕТР, юг Западной Сибири (равнинная территория).

При определении районов кроме объективного подхода к формированию групп субъектов, описанного выше, использовались и экспертные оценки, учитывающие как общность физико-географических условий субъектов, так и сходство их социально-экономической структуры. Для решения конкретных практических задач указанное районирование может быть детализировано путём выделения дополнительных районов в соответствии с *рис. 2*.

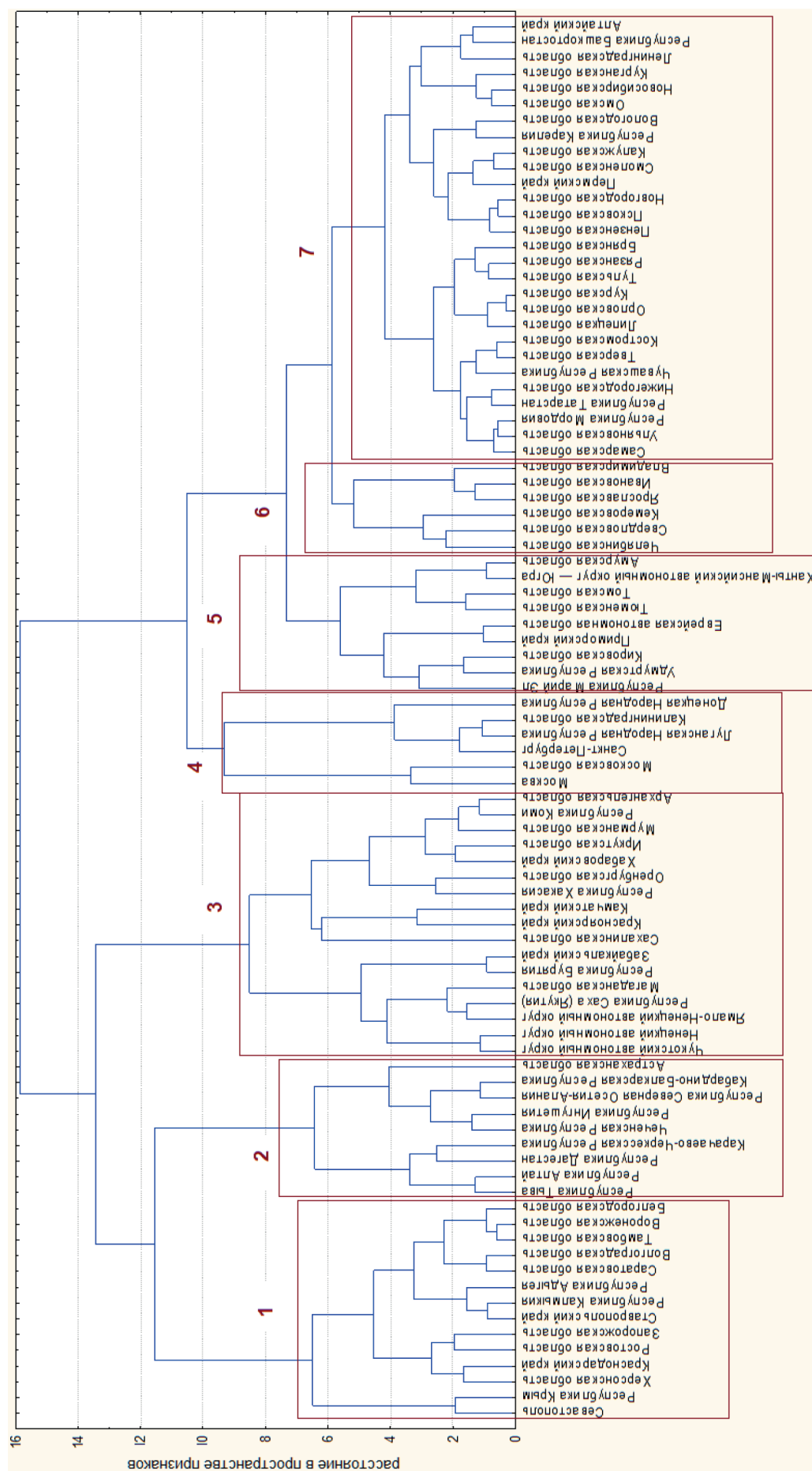


Рис. 2. Классификация субъектов Российской Федерации в соответствии со структурой загрязнения воздуха

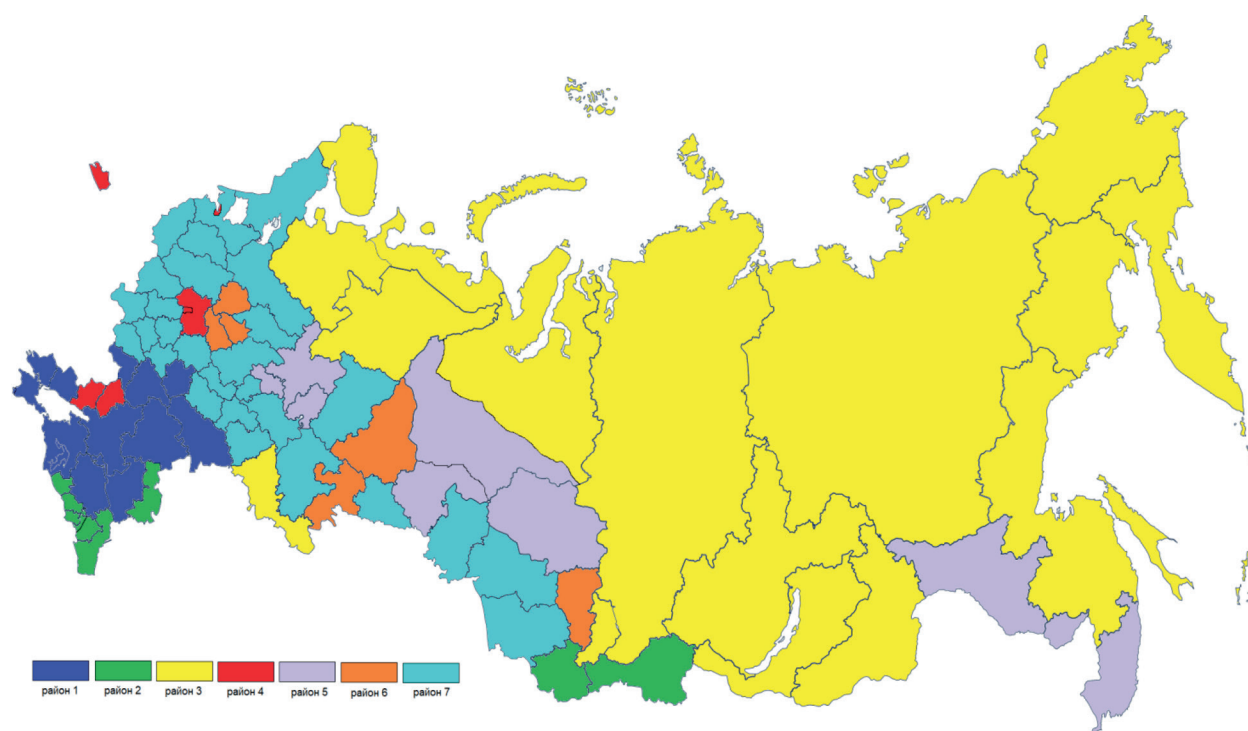


Рис. 3. Районирование территории России по структуре загрязнения аэроэкотоксикантами

В *таблице* представлен диапазон изменений среднегодовой концентрации пяти рассматриваемых экотоксикантов. Полу жирным шрифтом выделены максимальные значения.

Диапазон изменений концентрации экотоксикантов в субъектах России

Район	NO_2 , $\times 10^{15}$ молекул/ см^2	SO_2 , ед. Добсона	CH_2O , $\times 10^{15}$ молекул/ см^2	CO , $\times 10^{18}$ молекул/ см^2	Аэрозоль (АОТ), усл. ед.
1	3,90–5,30	0,06–0,14	1,21–1,58	1,96–2,10	0,28–0,42
2	2,90–4,40	0,05–0,10	1,08–1,43	1,64–1,84	0,24–0,56
3	2,80–3,90	0,05–0,13	0,84–1,24	1,84–2,29	0,42–0,91
4	5,60–12,00	0,12–0,18	1,28–1,41	2,05–2,07	0,32–0,60
5	3,30–5,30	0,08–0,11	1,27–1,54	2,03–2,20	0,51–0,78
6	4,80–7,60	0,10–0,15	1,18–1,45	1,97–2,05	0,57–0,65
7	3,80–5,80	0,09–0,13	1,17–1,39	1,98–2,06	0,44–0,68

Примечание: АОТ — оптическая толщина аэрозоля (*англ.* aerosol optical thickness).

Анализируя *таблицу*, можно заметить, что в структуре загрязнения воздуха района 1 концентрация формальдегида достигает максимальных значений, зафиксированных на территории страны. Здесь также высока концентрация диоксида азота и оксида углерода. Район 2 характеризуется наименьшими значениями концентрации всех рассматриваемых экотоксикантов. На территории субъектов, относящихся к району 3, отмечается наиболее высокая концентрация оксида углерода и аэрозоля. В приземном воздухе района 4 наибольших значений достигает концентрация диоксидов азота и серы. Кроме того, здесь отмечена высокая концентрация и трёх других экотоксикантов. В районе 5 близка к максимальной по стране концентрация формальдегида, оксида углерода и аэрозоля. Район 6 аналогичен по структуре загрязнения воздуха району 4, так как тоже объединяет наиболее промышленно развитые

субъекты. Однако концентрация почти всех аэротоксикантов здесь несколько ниже, чем в районе 4. Исключение составляет аэрозоль, концентрация которого превышает значение этого показателя для района 4. Район 7 занимает среднее положение среди других выделенных районов по концентрации практически всех рассматриваемых аэротоксикантов.

Важная характеристика экологического состояния субъекта Российской Федерации — показатели динамики изменения концентрации аэротоксикантов в приземном воздухе. Ниже представлены результаты анализа динамики концентрации диоксидов азота и серы, оксида углерода, формальдегида и аэрозоля за 2005–2023 гг. Статистическая значимость наблюдаемых трендов оценивалась по критерию Фишера на 90%-м и 95%-м уровне. Анализировались только статистически значимые тренды среднегодовой концентрации экотоксикантов.

Диоксид азота. На территории страны в рассматриваемый период были зафиксированы как положительные, так и отрицательные тренды среднегодовой концентрации диоксида азота. Значимое увеличение концентрации на 90%-м уровне наблюдалось в 23 субъектах, значимое уменьшение — в 8 субъектах. На 95%-м уровне значимости в 16 субъектах отмечался положительный тренд концентрации диоксида азота, в 7 субъектах — отрицательный тренд.

На *рис. 4* представлены наиболее значительные изменения концентрации диоксида азота в ряде субъектов России.

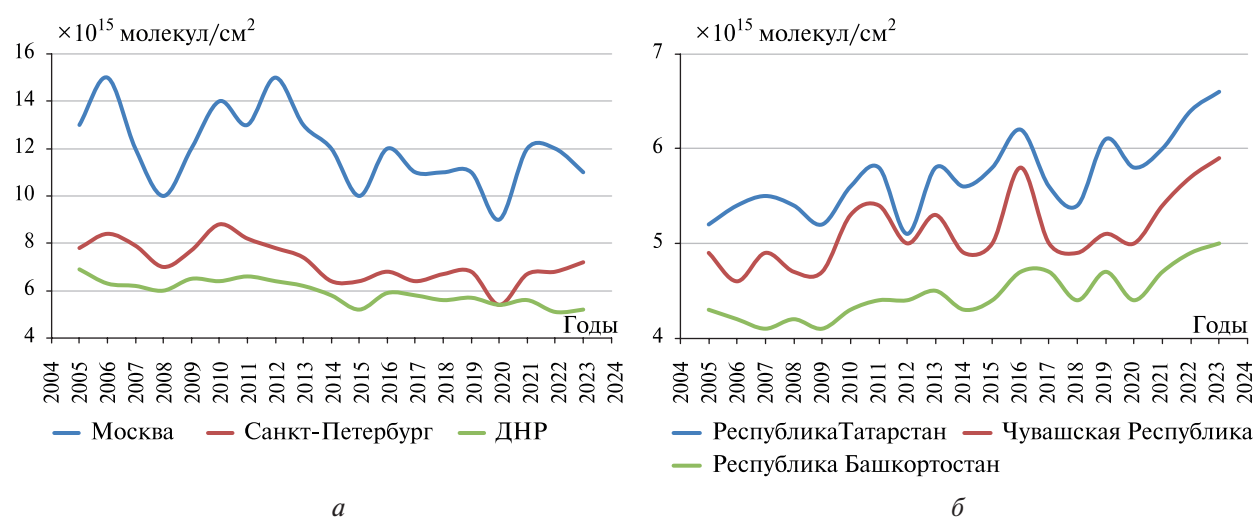


Рис. 4. Примеры отрицательных (а) и положительных (б) трендов среднегодовой концентрации диоксида азота (в 10^{15} молекул/см²), 2005–2023 гг.

Как видно из *рис. 4*, наиболее заметно концентрация диоксида азота уменьшалась в мегаполисах, что вероятно связано с внедрением более высоких экологических стандартов для транспорта и переводом теплоэлектростанций на газ. Сокращалась концентрация диоксида азота и в атмосфере новых территорий страны, где из-за сложной политической обстановки падала интенсивность промышленного производства. Увеличение концентрации диоксида азота наиболее характерно для нефтедобывающих и промышленно развитых регионов Поволжья и Урала.

Диоксид серы. Для большинства субъектов России характерно увеличение концентрации диоксида серы. В 52 субъектах отмечается значимый положительный тренд этого показателя на 90%-м уровне, а в 46 субъектах — на 95%-м уровне.

На *рис. 5* (см. с. 405) представлены наиболее значительные изменения концентрации диоксида серы в трёх субъектах страны. Из рисунка видно, что самыми быстрыми темпами концентрация диоксида серы растёт в наиболее развитых в промышленном отношении регионах, с большой плотностью транспортных магистралей. Максимальные значения коэффициента тренда концентрации этого экотоксиканта на территории Московской области, возможно, связаны с перемещением туда из Москвы части промышленных предприятий.



Рис. 5. Примеры трендов среднегодовой концентрации диоксида серы (в единицах Добсона), 2005–2023 гг.

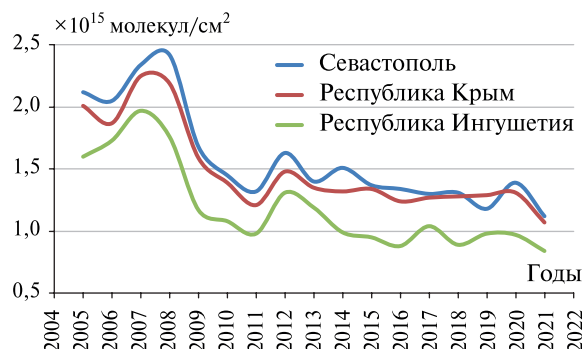


Рис. 6. Примеры трендов среднегодовой концентрации формальдегида (в 10^{15} молекул/см²), 2005–2023 гг.

Формальдегид. В подавляющем большинстве субъектов (85 из 89) в 2005–2023 гг. отмечался отрицательный тренд среднегодовой концентрации формальдегида на 90%-м уровне значимости, а в 81 субъекте — на 95%-м уровне значимости. На рис. 6 представлены изменения концентрации формальдегида в 3 субъектах с наибольшим отрицательным значением коэффициентов линейного тренда.

Формальдегид — это в основном вторичная примесь, образованная в процессе реакции углеводородов в атмосфере. В ряде случаев его образованию способствует наличие в атмосфере высокой концентрации оксида азота, а также высокой интенсивности солнечной радиации, при которой усиливаются реакции образования формальдегида из углеводородов. Поэтому высокая концентрация формальдегида не обязательно связана с выбросами этого вещества, она может создаваться вследствие общего высокого загрязнения атмосферного воздуха города. Наибольшая скорость уменьшения концентрации формальдегида в рассматриваемый период отмечалась в Крыму, что возможно связано с падением промышленного производства из-за сложной обстановки с водо- и электроснабжением.

Оксид углерода. На территории России в рассматриваемый период преобладало падение концентрации оксида углерода. В 26 субъектах наблюдался значимый отрицательный тренд этого показателя на 90%-м уровне, а в 10 субъектах — на 95%-м уровне. На рис. 7 представлены изменения концентрации оксида углерода в 3 субъектах с наибольшим отрицательным значением коэффициентов линейного тренда.

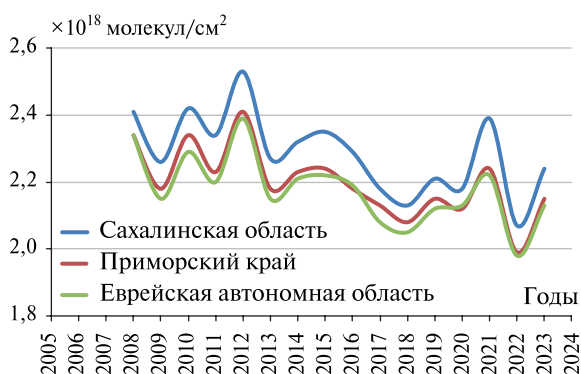


Рис. 7. Примеры трендов среднегодовой концентрации оксида углерода (в 10^{18} молекул/см²), 2005–2023 гг.

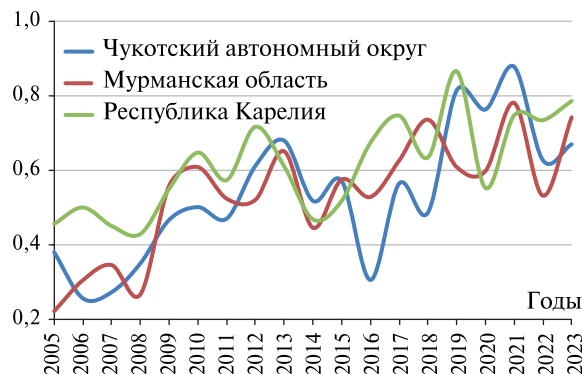


Рис. 8. Примеры трендов среднегодовой концентрации аэрозоля (в единицах АОТ), 2005–2023 гг.

Как видно из *рис. 7*, наиболее заметно концентрация оксида углерода уменьшается во многих субъектах Дальневосточного ФО, что возможно связано с уменьшением на их территории площади лесных пожаров в рассматриваемый период.

Аэрозоль. Для большинства субъектов России характерно увеличение среднегодовой концентрации аэрозоля. В 36 субъектах наблюдается значимый положительный тренд на 90%-м уровне, в 31 субъекте — на 95%-м уровне. На *рис. 8* (см. с. 405) представлены изменения концентрации аэрозоля в 3 субъектах с наибольшим коэффициентов линейного тренда.

Источниками аэрозолей в этих субъектах могут быть как участвовавшие лесные пожары, так и развитие добывающей промышленности.

Заключение

На основе использования спутниковых данных за 2005–2023 гг. о концентрации аэротоксикантов (диоксидов азота и серы, формальдегида, оксида углерода и аэрозоля) в приземной атмосфере был составлен рейтинг субъектов Российской Федерации по величине комплексного показателя загрязнения атмосферного воздуха с учётом классов опасности загрязняющих веществ. С использованием кластерного анализа были также определены территории со сходной структурой загрязнения воздуха различными веществами. Оценка трендов среднегодовой концентрации экотоксикантов позволила определить субъекты, в которых отмечаются статистически значимые изменения концентрации различных загрязняющих веществ в нижней тропосфере.

Результаты работы подтверждают, что уровень загрязнения атмосферы конкретных субъектов, а также тенденции его изменения являются результатом комплексного воздействия как антропогенных факторов (интенсивности транспортных потоков, степени развития определённых отраслей промышленности и т. д.), так и природных условий, характеризующихся, например, высокой степенью пожароопасности.

Представленный в работе подход даёт возможность определить место конкретного субъекта в общем рейтинге регионов России по степени загрязнения воздуха; выявить наиболее негативные факторы, определяющие место субъекта в этом рейтинге; проанализировать особенности структуры загрязнения воздуха в заданном регионе; установить их причины и принять соответствующие меры. Полученные пространственные и временные оценки экологической ситуации позволяют включить информацию о них в процессы принятия решений при разработке стратегии развития регионов России и определить оптимальные пути управления экологическими рисками. Результаты исследования могут быть полезны при реализации Национального проекта «Экология» (Доклад..., 2024).

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. Бобылёв Н. Г., Гадаль С., Коновалова М. О. и др. Ранжирование регионов Арктической зоны Российской Федерации по индексу экологической безопасности // Север и Рынок: формирование экономического порядка. 2020. Т. 69. № 3. С. 17–40. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2020.69.002.
2. Брилль А. А., Константинова А. М., Лупян Е. А., Буцев М. А. Возможности работы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
3. Васильев М. П., Тронин А. А. Изменение антропогенной нагрузки на экосистемы регионов России в начале XXI в. с использованием данных дистанционного зондирования // Современные про-

- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 95–102. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-95-102
4. Деза Е., Деза М. М. Энциклопедический словарь расстояний. М: Наука, 2008. 444 с.
5. Доклад об общественных приоритетах относительно нового Национального проекта, направленного на экологическое благополучие населения (2025–2030 годы). АНО «Центр содействия природоохранным инициативам «Экология», 2024. 23 с.
6. Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
7. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». 2021. 988 с.
8. Тронин А. А. Ранжирование регионов России по уровню экологической безопасности // Региональная экология. 2019. № 1(55). С. 5–12. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-1-5-12
9. Тронин А. А., Васильев М. П., Неробелов Г. М. и др. Базы данных и сервисы спутниковых измерений газового и аэрозольного состава атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 97–116. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-97-116
10. Черногаева Г. М., Жадановская Е. А., Журавлева Л. Р., Малеванов Ю. А., Тишков А. А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века. М., 2019. 232 с.
11. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / под ред. Н. В. Кобышевой, К. Ш. Хайруллина. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 319 с.
12. Dang R., Jacob D. J., Shah V. et al. Background nitrogen dioxide (NO₂) over the United States and its implications for satellite observations and trends: effects of nitrate photolysis, aircraft, and open fires // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. V. 23. P. 6271–6284. <https://doi.org/10.5194/acp-23-6271-2023>.
13. World Risk Report 2011 / United Nations University, Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), Bündnis Entwicklung Hilft (Alliance Development Works). 2011. 74 p.
14. Zhang Q., Boersma K. F., Zhao B. et al. Quantifying daily NO_x and CO₂ emissions from Wuhan using satellite observations from TROPOMI and OCO-2 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. V. 23. P. 551–563. <https://doi.org/10.5194/acp-23-551-2023>.

Zoning of Russian regions by air pollution level based on the results of satellite observations

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

¹ Saint Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: a.a.tronin@gmail.com

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia

The results of analysis of the spatio-temporal distribution of ecotoxicant concentrations in the atmosphere of Russian regions were obtained on the basis of satellite observations of nitrogen and sulfur dioxide, formaldehyde, carbon monoxide and aerosol concentrations in the period from 2004 to 2023. As a result of the study, subjects of the Russian Federation characterized by different values of pollutant concentrations were identified, and the regions were ranked in accordance with these indicators, taking into account the hazard classes of ecotoxins. Using cluster analysis, territories with a similar structure of air pollution by various ecotoxins were also identified. An assessment of trends in average annual concentrations of ecotoxins made it possible to identify regions in which statistically significant changes in the concentrations of various pollutants in the lower troposphere are observed. The obtained data can be useful for analyzing the environmental situation in large areas and developing proposals for its improvement in specific regions, taking into account the identification of the most negative factors that determine the place of the region in the overall rating.

Keywords: concentrations of ecotoxics, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, formaldehyde, carbon monoxide, aerosol, ranking of subjects of the Russian Federation, zoning of the territory

Accepted: 06.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-398-408

References

1. Bobylev N. G., Gadal S., Konovalova M. O. et al., Regional ranking of the Arctic Zone of the Russian Federation on the basis of the environmental security index, *Sever i Rynok: formirovaniye ehkonomicheskogo poryadka*, 2020, V. 69, No. 3, pp. 17–40 (in Russian), DOI: 10.37614/2220-802X.2.2020.69.002.
2. Bril A. A., Konstantinova A. M., Loupyan E. A., Burtsev M. A., Capabilities of IKI-Monitoring Shared Use Center operation with satellite monitoring–based trace gas component data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
3. Vasiliev M. P., Tronin A. A., Changes in the anthropogenic load on ecosystems in the territorial subjects of the Russian Federation in the early 21st century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 1, pp. 95–102 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-95-102.
4. Deza E., Deza M. M., *Ehntsiklopedicheskii slovar' rasstoyanii* (Dictionary of distances), Moscow: Nauka, 2008, 444 p. (in Russian).
5. *Doklad ob obshchestvennykh prioritetakh otnositel'no novogo Natsional'nogo proekta, napravlenno na ehkologicheskoe blagopoluchie naseleniya (2025–2030)* (Report on public priorities regarding the new National Project aimed at the environmental well-being of the population (2025–2030)), ANO “Center for Assistance to Environmental Initiatives “Ecology”, 2024, 23 p. (in Russian).
6. Loupyan E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
7. *Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF “Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 “Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya”* (Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation “On approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans”), Jan. 28, 2021, No. 2, 988 p. (in Russian).
8. Tronin A. A., Environmental ranking of Russian Federal subjects, *Regional Ecology*, 2019, No. 1(55), pp. 5–12 (in Russian), DOI: 10.30694/1026-5600-2019-1-5-12.
9. Tronin A. A., Vasiliev M. P., Neroblov G. M. et al., Satellite observation datasets and web-services of gas and aerosol composition of the atmosphere, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 97–116 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-97-116.
10. Chernogaeva G. M., Zhadanovskaya E. A., Zhuravleva L. R., Malevanov Yu. A., Tishkov A. A., *Zagryaznenie okruzhayushchei sredy v regionakh Rossii v nachale XXI veka* (Environmental pollution in Russian regions at the beginning of the XXI century), Moscow, 2019, 232 p. (in Russian).
11. *Ehntsiklopediya klimaticheskikh resursov Rossiiskoi Federatsii* (Encyclopedia of climatic resources of the Russian Federation), N. V. Kobysheva, K. Sh. Khairullin (eds.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005, 319 p. (in Russian).
12. Dang R., Jacob D. J., Shah V. et al., Background nitrogen dioxide (NO₂) over the United States and its implications for satellite observations and trends: effects of nitrate photolysis, aircraft, and open fires, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, V. 23, pp. 6271–6284, <https://doi.org/10.5194/acp-23-6271-2023>.
13. *World Risk Report 2011*, United Nations University, Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), Bündnis Entwicklung Hilft (Alliance Development Works), 2011, 74 p.
14. Zhang Q., Boersma K. F., Zhao B. et al., Quantifying daily NO_x and CO₂ emissions from Wuhan using satellite observations from TROPOMI and OCO-2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, V. 23, pp. 551–563, <https://doi.org/10.5194/acp-23-551-2023>.