Анализ оптической толщины аэрозоля в атмосфере России по спутниковым данным

А. А. Тронин, А. В. Киселёв, М. П. Васильев, П. А. Безрученко

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

В исследовании использованы ежесуточные данные об оптической толщине аэрозоля по всей вертикали атмосферы на основе измерений спутниковой системы AURA с прибором OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) с пространственным разрешением 0,25° за период с 2005 по 2025 г. По данным обработанных изображений построена карта средних многолетних значений для сезона июнь – сентябрь на всю территорию страны. Вычислены средние многолетние, минимальные и максимальные значения для каждого субъекта РФ. Получены тренды величин оптической толщины аэрозоля и определена их статистическая значимость. Анализ трендов показал, что практически по всей территории России отмечен рост оптической толщины аэрозоля на интервале 2005–2025 гг. по средним данным за период с июня по сентябрь. Климатические условия ряда южных регионов Европейской России позволяют провести анализ оптической толщины аэрозоля в течение всего года. Годового ход оптической толщины аэрозоля показал, что максимум приходится на период с апреля по июль, а минимальные значения отмечаются в ноябре.

Ключевые слова: оптическая толщина аэрозоля, спутниковые данные, загрязнение атмосферы, субъекты Российской Федерации

Одобрена к печати: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-403-411

Введение

Атмосферный аэрозоль — важный компонент атмосферы. Он оказывает существенное влияние на метеорологические процессы, радиационный баланс атмосферы, а также является важнейшим аэротоксикантом. Взвешенные вещества или аэрозоли относятся к приоритетным аэротоксикантам (имеют 3-й класс опасности), наряду с диоксидами азота и серы, озоном (Руководство..., 2017). Наземная сеть станций наблюдений за качеством воздуха ведёт непрерывный мониторинг концентрации взвешенных веществ (http://voeikovmgo.ru/index.php/srednegodovye-kontsentratsii-dioksida-azota-v-gorodakh-na-territorii-rossii). В России с 2018 г. действует федеральный проект «Чистый воздух» для поэтапного снижения выбросов опасных загрязняющих веществ. Актуальность проблемы подчёркивает тот факт, что в 2024 г. в России оставалось 105 городов, в атмосфере которых среднегодовая концентрация взвешенных веществ была равна или превышала предельно допустимую концентрацию (ПДК). В 15 городах отмечена среднегодовая концентрация выше 3 ПДК и среди них такие крупные города, как Махачкала, Смоленск, Комсомольск-на-Амуре (http://voeikovmgo.ru/index.php/srednegodovye-kontsentratsii-dioksida-azota-v-gorodakh-na-territorii-rossii).

Наблюдения за концентрацией взвешенных частиц ведутся главным образом в городах и на промышленных предприятиях, тогда как на больших территориях, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, нет наземной сети мониторинга. В этих условиях спутниковые методы контроля загрязнения атмосферы представляют собой адекватный инструмент для мониторинга содержания взвешенных частиц в атмосфере в масштабе всей страны. Спутниковые измерения оптической толщины аэрозоля позволяют оценить объём взвешенных веществ в толще атмосферы, отслеживать распространение аэрозоля и анализировать динамику процессов переноса.

Данные и методы

В исследовании использованы данные об оптической толщине аэрозоля AOD (*англ.* aerosol optical depth) на основе измерений прибором OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument), расположенным на борту спутника AURA. Для работы применялся продукт OMAEROe.003 (*англ.* OMI/Aura multi-wavelength aerosol optical depth and single-scattering albedo dataset, Version 3) (Stein-Zweers, Veefkind, 2012), предоставляющий измерения оптической толщины аэрозоля в диапазоне волн 300–500 нм. Измерения приводятся для всех точек поверхности земного шара с пространственным разрешением 0,25° на каждый день года, начиная с 2005-го по 2025-й. Для расчётов были использованы ежесуточные данные, на основе которых были вычислены среднемесячные и среднегодовые значения в каждой точке исследуемой территории, а также средние по площадям субъектов Российской Федерации.

Измеренная прибором OMI оптическая толщина аэрозоля характеризует всю атмосферу. Следует отметить, что вертикальное распределение аэрозолей по результатам лазерного зондирования со спутника ICESat-2 (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2) показало, что ежегодно в диапазоне от 60° ю.ш. до 60° с. ш. 78,4 % частиц находится на высотах 0–2 км, 17,0 % — 2–4 км и 4,5 % — 4–6 км соответственно (Kuang et al., 2025).

Предварительный анализ имеющейся информации продемонстрировал значительные проблемы с качеством данных, полученных в зимнее время. К хорошо известным трудностям сбора данных при низком зенитном угле Солнца добавились проблемы восстановления оптической толщины аэрозолей на поверхностях, имеющих высокие коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) в видимом диапазоне спектра: снег, лёд, сухие соляные озёра. Для решения этой проблемы разрабатываются специальные алгоритмы, однако качество полученных данных остаётся неудовлетворительным (Bi et al., 2019; Swain et al., 2024).

Современное состояние технических средств и алгоритмов обработки не позволяет вести круглогодичный мониторинг оптической толщины аэрозолей на всей территории России. На основе анализа среднемесячных данных оптической толщины аэрозолей, а также информации о снежном покрове на территорию России (Hall et al., 2002) были сделаны следующие предложения: 1) оценивать оптическую толщину аэрозолей на всей территории России в бесснежный сезон — период с июня по сентябрь; 2) провести анализ годового хода оптической толщины аэрозолей на территории равнинных южных районов России, не имеющих устойчивого снежного покрова в зимнее время, — Краснодарского края, Ростовской области, Астраханской области, Республики Калмыкия, Ставропольского края и Республики Адыгея.

Результаты

В результате обработки спутниковых данных на всю территорию Российской Федерации в бесснежный сезон (июнь–сентябрь) и на период с 2005 по 2025 г. была построена карта оптической толщины аэрозоля на длине волны 483 нм (*рис. 1*).

Анализ полученной карты говорит о зависимости распределения оптической толщины аэрозолей от широты местности. Атмосфера арктических регионов (приблизительно выше 65° с. ш.) имеет минимальные значения оптической толщины аэрозоля: в Мурманской области — 0,22; в Ненецком автономном округе — 0,24. Полоса от 65 до 55° с. ш. демонстрирует максимальные величины оптической толщины аэрозоля. Так, средние значения в Томской области составляют 0,41, а в Пермском крае — 0,36. На востоке Якутии и в Хабаровском крае отмечаются максимальные значения оптической толщины аэрозоля: в диапазоне 1–1,5. Максимальные величины по субъектам федерации зафиксированы в Москве — 0,48, Еврейской автономной области — 0,47, Приморском крае — 0,46. Далее к югу до Кавказа находится зона с минимальными значениями оптической толщины аэрозоля в тёплый период года: в Ставропольском крае — 0,23; в Астраханской области — 0,22. Вершины кавказских гор покрыты снегом и в летнее время, поэтому величины оптической толщины аэрозоля в горах не отражают содержание аэрозоля.

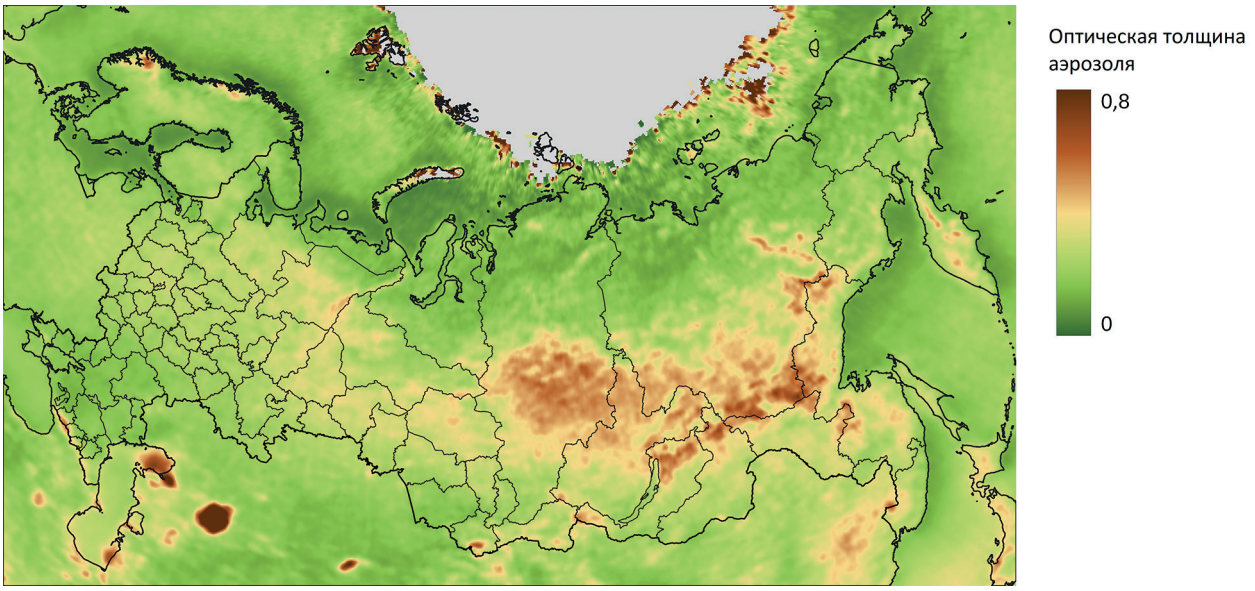


Рис. 1. Среднемноголетняя оптическая толщина аэрозоля на длине волны 483 нм

В Казахстане области высоких значений оптической толщины аэрозоля зафиксированы на солончаках Мангышлака и сухого дна Аральского моря. Эти же области являются мощными источниками выброса аэрозоля в атмосферу, например, виден шлейф выноса аэрозоля с Мангышлака на акваторию Каспийского моря.

Анализ оптической толщины аэрозоля по субъектам Российской Федерации показал среднее значение, равное 0,35, минимальное — 0,21 (Мурманская область), максимальное — 0,48 (Москва). Высокие значения оптической толщины аэрозоля, наблюдаемые в лесной зоне Якутии и Красноярского края, компенсируются низкими значениями в Арктической зоне этих регионов, поэтому средние значения для этих регионов — 0,25 для Якутии и 0,28 для Красноярского края — ниже средних по стране.

Анализ трендов оптической толщины аэрозоля показал рост практически во всех субъектах федерации с 2005 по 2025 г. На *рис. 2* представлены изменения оптической толщины аэрозоля в атмосфере регионов с высоким положительным трендом: Новгородская и Курганская области, Забайкальский и Приморский край. Во всех регионах тренд положительный и статистически значимый с вероятностью 95 %.

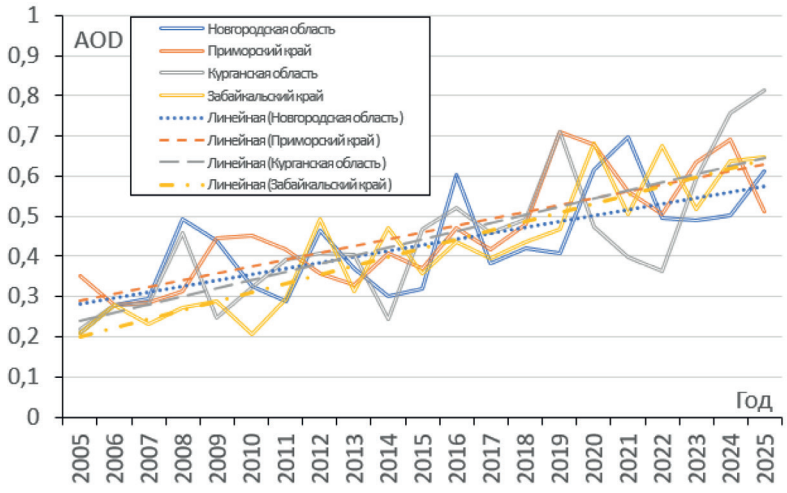


Рис. 2. Среднегодовые (июнь – сентябрь) значения и линейные тренды оптической толщины аэрозоля в атмосфере некоторых регионов России

В качестве примера измерения аномальных значений оптической толщины аэрозоля можно привести ситуацию августа 2010 г., когда торфяные пожары в Центральной России вызвали серьёзное загрязнение воздушного бассейна как газообразными аэротоксикантами, так и аэрозолем (*рис. 3*). На *рис. 3* отчётливо видна область аномально высоких значений оптической толщины аэрозоля над Центральной Россией вплоть до Урала. Расчёты для Москвы показали необычно высокую величину оптической толщины аэрозоля в августе 2010 г., достигшую значения 1,2 (*рис. 4*).

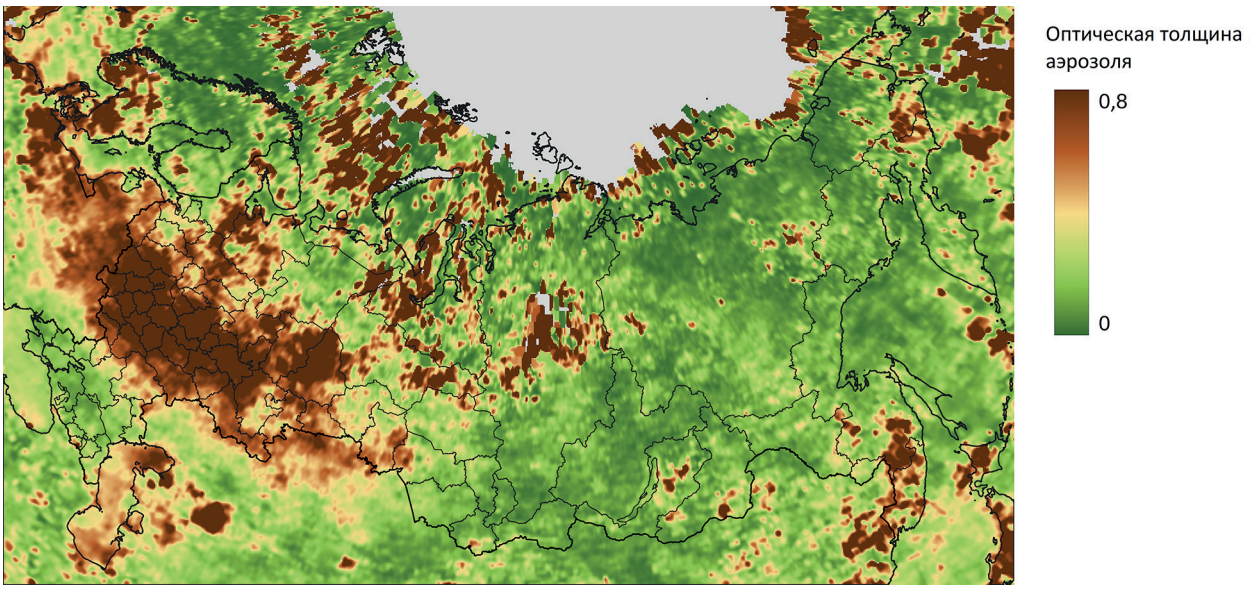


Рис. 3. Оптическая толщина аэрозоля в августе 2010 г.

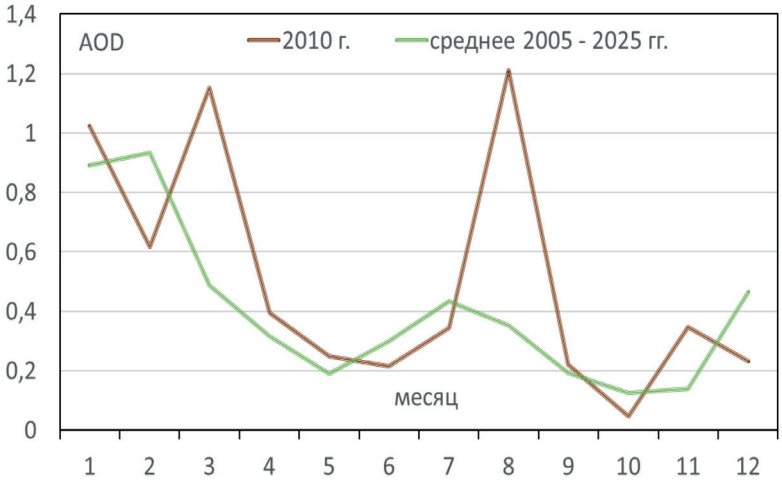


Рис. 4. Среднемесячная оптическая толщина аэрозоля в Москве с 2005 по 2025 г. и в 2010 г.

Загрязнение атмосферы Москвы в конце июля – начале августа 2010 г. достигло критических уровней. С 1 по 19 августа концентрация загрязняющих веществ в атмосфере росла по сравнению с июлем, а с 4 по 9 августа (за исключением 5 августа) непрерывно превышала предельно допустимую максимальную разовую концентрацию до 67 ч подряд. Максимальная разовая концентрация загрязняющих веществ в этот период достигала: угарный газ — 7,5 ПДК, PM10 — 5,6 ПДК, углеводороды — более 15 мг/м^3 (выше обычного уровня почти в 10 раз). Среднесуточный норматив по PM10 был превышен до 14 раз, по оксиду углерода — до 6 раз, по отдельным углеводородам — в 4–20 раз (Доклад..., 2011). Следует отметить, что

сочетание воздействия жары и высокой концентрации аэротоксикантов, и аэрозоля в том числе, в июле августе 2010 г. привело к повышенной смертности населения. Так, в Москве «в течение 5 дней (6–10 августа) показатель смертности превышал фоновый уровень в 3 раза» (Ревич и др., 2015).

Как было показано выше, южные районы Европейской России отличаются низкими значениями оптической толщины аэрозоля, но имеют наилучшие условия наблюдения в России. Для анализа данных в течение всего года были выбраны шесть регионов юга Европейской России, находящихся в схожих географических условиях: Краснодарский край, Ростовская область, Астраханская область, Республика Калмыкия, Ставропольский край и Республика Адыгея. Климатически регионы сходны по среднегодовой температуре, но заметно различаются по количеству осадков. Среднегодовые значения оптической толщины аэрозоля для этих регионов на период 2005–2025 гг. показаны на *рис. 5*.

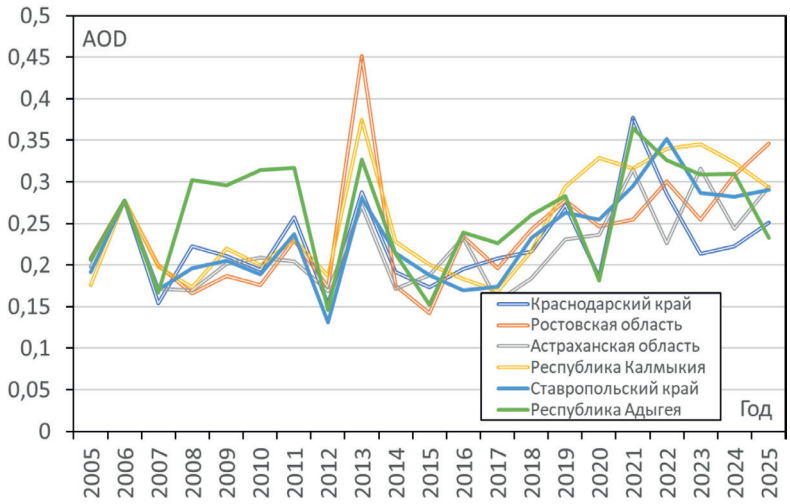


Рис. 5. Среднегодовые значения оптической толщины аэрозоля для южных регионов Европейской России

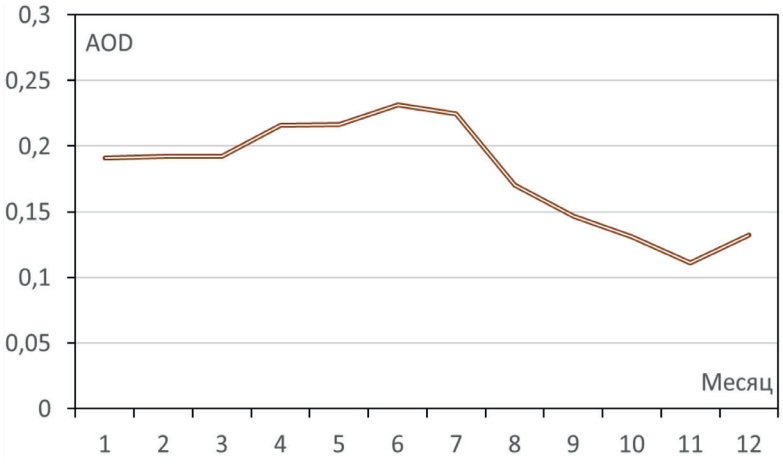


Рис. 6. Среднемесячные значения оптической толщины аэрозоля для южных регионов Европейской России с 2005 по 2025 г.

Можно отметить, что минимальные значения оптической толщины аэрозоля отмечены во всех регионах в 2012 и 2015 гг. — от 0,13 в Ставропольском крае. Максимальные значения приходятся на период 2020–2025 гг. и достигают величины 0,38 в Краснодарском крае в 2021 г. Средние значения, полученные за 20-летний интервал с 2005 по 2025 г., показывают

интервал от 0,22 в Краснодарском крае и Астраханской области до 0,25 в Калмыкии и Адыгее. С 2005 по 2019 г. в регионе наблюдалась относительно стабильная ситуация, если не считать аномальный 2013 г. С 2019 г. во всех субъектах начался рост оптической толщины аэрозоля.

Для анализа сезонного хода оптической толщины аэрозоля были вычислены среднемесячные значения шести регионов юга Европейской России для периода 2005–2025 гг. Сезонный ход во всех субъектах федерации оказался одинаковым, что позволило рассматривать сезонный ход макрорегиона целиком. Анализ сезонного хода оптической толщины аэрозоля в южных регионах показал, что максимум приходится на тёплый (агрономический) период с апреля по июль и достигает значения 0,23 в июне (*рис. 6*). Минимальные значения зафиксированы в ноябре — 0,11. Затем начинается небольшой рост в декабре – феврале, возможно, из-за появления фрагментарного снежного покрова.

Обсуждение результатов

В первую очередь необходимо отметить проблемы получения данных об оптической толщине аэрозоля на фоне поверхностей, имеющих высокие КСЯ на длине волны определения оптической толщины. На *рис. 7* приведены для примера спектры некоторых минералов, веществ и растений, широко распространённых на изучаемой территории, акцент сделан на объекты с высоким и низким КСЯ на длине волны 483 нм. Снег, гипс и галит (поверхности солончаков и сухих солёных озёр) имеют КСЯ на уровне 0,6–0,9, что препятствует корректной работе алгоритмов по восстановлению оптической толщины аэрозоля.

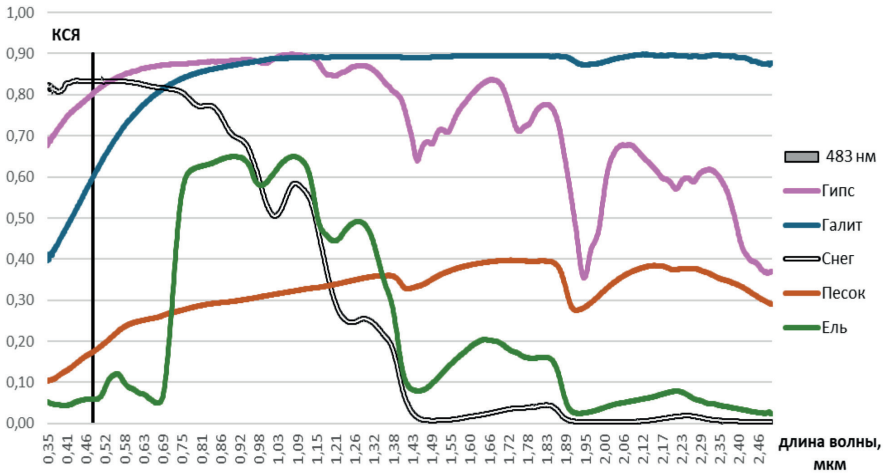


Рис. 7. Коэффициенты спектральной яркости некоторых минералов, веществ и растений на длине волны 483 нм

Таким образом, можно констатировать, что современные спутниковые системы наблюдения за оптической толщиной аэрозоля в видимом диапазоне ограничены в наблюдениях во времени и пространстве наличием на земной поверхности объектов с высоким КСЯ: снег, сухие соляные озёра.

Высокие значения оптической толщины аэрозоля на территории России приурочены к зоне лесов, что, возможно, указывает на лесные пожары как мощный источник аэрозоля в атмосфере. Максимальные значения наблюдаются в лесных и таёжных регионах (юг Якутии и Красноярского края, север Хабаровского края) с малой плотностью населения и схожи с картами оценки горимости лесов (Котельников и др., 2023). 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, CO и CO_2 (Nurrohman et al., 2024).

В целом по всей территории России наблюдается рост оптической толщины аэрозоля во времени на интервале 2005–2025 гг. по средним данным за тёплый сезон с июня по сентябрь. Анализ тренда по южным регионам за полный год также указывает на рост оптической толщины аэрозоля. Если с 2005 до 2017 г. на юге России наблюдались стабильно низкие значения оптической толщины аэрозоля, исключая аномалию 2013 г., то в 2020–2025 гг. отмечен рост значений. Скорее всего наблюдаемые высокие величины оптической толщины аэрозоля связаны с долговременной засухой и процессами опустынивания, которые ведут к песчано-пыльным бурям и повышению концентрации аэрозоля в атмосфере (Третий..., 2022; Шинкаренко и др., 2026).

Отдельный вопрос для обсуждения: как воспринимать спутниковые данные об оптической толщине аэрозоля с точки зрения наземных наблюдений и воздействия на здоровье населения. Сразу отметим, что сеть наблюдений за концентрацией аэрозоля сконцентрирована в городах, но присутствует не во всех регионах. Так, мониторинг загрязнения атмосферного воздуха в 2022 г. в Республике Калмыкия не проводился (Государственный..., 2023). В Ростовской области ведётся постоянный мониторинг качества атмосферного воздуха, и он показывает высокую концентрацию аэрозоля в городах области. Например, в 2024 г. в Ростове-на-Дону средняя за год концентрация взвешенных веществ в целом по городу составила 2,2 ПДК, в городе Шахты — 4,3 ПДК, а в городе Новочеркасске она оказалась выше значений 2023 г. и равна 0,421 мг/м^3 или 5,6 ПДК. Максимальная разовая концентрация в Ростове-на-Дону достигла 7,1 ПДК (Экологический..., 2025). Заметим, что по спутниковым наблюдениям южные регионы Европейской России характеризуются минимальными значениями оптической толщины. При этом в городах фиксируются аномально высокие значения концентрации взвешенных веществ. Разумеется, нельзя непосредственно сравнивать мелкомасштабные спутниковые съёмки с точечными наземными наблюдениями, но наблюдаемый парадокс требует дополнительного изучения. Постепенное повышение пространственного и временного разрешения спутниковых съёмок позволит решить эту проблему.

Заключение

В результате исследований были проанализированы многолетние данные об оптической толщине аэрозоля на территорию Российской Федерации. По данным обработанных изображений построена карта средних многолетних значений для сезона июнь–сентябрь и периода 2005–2025 гг. на все регионы России и сопредельные территории. Вычислены средние многолетние, минимальные и максимальные значения для каждого региона, построена корреляционная матрица средних многолетних наблюдаемых параметров, определена значимость коэффициентов корреляции. Получены тренды величин оптической толщины аэрозоля и определена их статистическая значимость.

Анализ данных показал связь высоких значений оптической толщины аэрозоля с зоной лесов для сезона июнь–сентябрь. Практически по всей территории России отмечен рост оптической толщины аэрозоля во времени на интервале 2005–2025 гг. по средним данным за тёплый сезон с июня по сентябрь.

Для южных регионов Европейской России анализ годового хода оптической толщины аэрозоля показал, что максимум приходится на тёплый сезон с апреля по июль, а минимальные значения отмечаются в ноябре.

Возможности спутниковой съёмки в оптическом диапазоне для определения оптической толщины аэрозоля в видимом диапазоне ограничены с относительно низкими значениями КСЯ. Районы с высокими КСЯ: снег, сухие соляные озёра — в настоящее время недоступны для наблюдения оптическими методами.

Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 25-44-02032 «Синергетическое влияние ключевых токсичных компонентов твёрдых частиц на здоровье человека в условиях перегрева окружающей среды во время песчаных и пылевых бурь».

Литература

1. Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2010 году / под общ. ред. А. О. Кульбачевского. М.: Правительство Москвы, Департамент природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы, 2011. 135 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году». М.: Минприроды России, МГУ имени М. В. Ломоносова, 2023. 686 с.
3. *Котельников Р. В.*, *Лупян 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.
4. *Ревич Б. А.*, *Шапошников Д. А.*, *Першаген Г.* Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // Профилактическая медицина. 2015. Т. 18. № 5. С. 29–33. DOI: 10.17116/profmed201518529-33.
5. Руководство по комплексной профилактике экологически обусловленных заболеваний на основе оценки риска. М., 2017. 68 с.
6. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.
7. *Шинкаренко С. С.*, *Барталев С. А.*, *Биарсланов А. Б. и др.* Мониторинг сезонных и межгодовых изменений площади открытых песков и дефлированных пастбищ на юго-востоке европейской части России в 2019–2025 гг. по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 1. С. 365–372. DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-365-372.
8. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2024 году». Ростов н/Д: Альтаир, 2025. 372 с.
9. *Bi J.*, *Belle J. H.*, *Wang Y. et al.* Impacts of snow and cloud covers on satellite-derived $PM_{2.5}$ levels // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 665–674. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.002.
10. *Hall D. K.*, *Riggs G. A.*, *Salomonson V. V. et al.* MODIS snow-cover products // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. Iss. 1–2. pp. 181–194. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0.
11. *Kuang S.*, *McGill M.*, *Gomes J. et al.* Global aerosol climatology from ICESat-2 lidar observations // Remote Sensing. 2025. V. 17. Iss. 13. Article 2240. https://doi.org/10.3390/rs17132240.
12. *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.
13. *Stein-Zweers D.*, *Veefkind P.* OMI/Aura Multi-Wavelength Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo Daily L3 Global 0.25x0.25 deg Lat/Lon Grid. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2012. DOI: 10.5067/AURA/OMI/DATA3004.
14. *Swain B.*, *Vountas M.*, *Deroubaix A. et al.* Retrieval of aerosol optical depth over the Arctic cryosphere during spring and summer using satellite observations // Atmospheric Measurement Techniques. 2024. V. 17. Iss. 1. P. 359–375. DOI: 10.5194/amt-17-359-2024.

Analysis of aerosol optical density in the atmosphere of Russia using satellite data

A. A. Tronin, A. V. Kiselev, M. P. Vasiliev, P. A. Bezruchenko

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

The study used daily data on optical density of aerosols in the entire atmosphere based on measurements by the AURA satellite system with OMI (Ozone Monitoring Instrument) with a spatial resolution of 0.25° for the period from 2005 to 2025. Based on the processed images, a map of the average long-term values for the June–September season for the entire territory of the country was constructed. Long-term average, minimum and maximum values for each subject of the Russian Federation were calculated. The trends of aerosol optical density values were calculated and their statistical significance was determined. Trend analysis showed that an increase in the optical density of

aerosol was observed in almost the entire territory of Russia in the period 2005–2025 according to the average data for the period from June to September. The climatic conditions of several southern regions of European Russia make it possible to analyze optical density of aerosol throughout the year. The annual course of aerosol optical density revealed that the maximum occurs in the period from April to July, and the minimum values are observed in November.

Keywords: aerosol optical density, satellite data, atmospheric pollution, subjects of the Russian Federation

Accepted: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-403-411

References

1. *Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2010 godu* (Report on the state of the environment in the city of Moscow in 2010), Moscow: Moscow Government, Department of Nature Management and Environmental Protection of Moscow, 2011, 135 p. (in Russian).
2. *Gosudarstvennyy doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2022 godu"* (State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022"), Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Lomonosov Moscow State University, 2023, 686 p. (in Russian).
3. 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.
4. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Pershagen G., New epidemiological model for assessment of the impact of extremely hot weather and air pollution on mortality (in case of the Moscow heat wave of 2010), *Profilakticheskaya meditsina*, 2015, V. 18, No. 5, pp. 29–33 (in Russian), DOI: 10.17116/profmed201518529-33.
5. *Rukovodstvo po kompleksnoi profilaktike ehkologicheski obuslovlennykh zabolevanii na osnove otsenki riska* (Guidelines for integrated prevention of environmentally induced diseases based on risk assessment), Moscow, 2017, 68 p. (in Russian).
6. *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 676 p. (in Russian).
7. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Biarslanov A.B. et al., Monitoring seasonal and interannual changes in the area of open sands and deflated pastures in southeastern European Russia from 2019 to 2025 using Sentinel-2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2026, V. 23, No. 1, pp. 365–372 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-365-372.
8. *Ehkologicheskii vestnik Dona "O sostoyanii okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov Rostovskoi oblasti v 2024 godu"* (Ecological Bull. Don "On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2024"), Rostov-on-Don: Altair, 2025, 372 p. (in Russian).
9. Bi J., Belle J.H., Wang Y. et al., Impacts of snow and cloud covers on satellite-derived $PM_{2.5}$ levels, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 221, pp. 665–674, https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.002.
10. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. et al., MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 83, Iss. 1–2, pp. 181–194, https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0.
11. Kuang S., McGill M., Gomes J. et al., Global aerosol climatology from ICESat-2 lidar observations, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, Iss. 13, Article 2240, https://doi.org/10.3390/rs17132240.
12. 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.
13. Stein-Zweers, D., Veefkind P., *OMI/Aura Multi-Wavelength Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo Daily L3 Global 0.25x0.25 deg Lat/Lon Grid*, NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2012, DOI: 10.5067/AURA/OMI/DATA3004.
14. Swain B., Vountas M., Deroubaix A. et al., Retrieval of aerosol optical depth over the Arctic cryosphere during spring and summer using satellite observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, V. 17, Iss. 1, pp. 359–375, DOI: 10.5194/amt-17-359-2024.