

## Воздействие городского аэрозоля на климатические процессы и качество воздуха

*А.С. Гинзбург<sup>1)\*</sup>, Ю.О. Шувалова<sup>2)</sup>, С.А. Докукин<sup>1)</sup>, Н.Д. Тихоненко<sup>3)</sup>*

<sup>1)</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1

<sup>2)</sup> ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ»,  
Россия, 123376, Москва, Большой Предтеченский пер., 13

<sup>3)</sup> НПП «Мэп Мейкер»,  
Россия, 123242, Москва, Нововаганьковский пер., 5 стр. 1

\*Адрес для переписки: [gin@ifaran.ru](mailto:gin@ifaran.ru)

**Реферат.** Аэрозольное загрязнение атмосферы оказывает существенное влияние на метеорологические и климатические процессы, а также качество воздуха в городских агломерациях. Городской аэрозоль преимущественно образуется из выбросов предприятий промышленности и энергетики, транспорта и при сжигании мусора. Несмотря на некоторое снижение в последние десятилетия аэрозольных выбросов во многих мегаполисах мира, аэрозольное воздействие играет значительную роль в формировании городского и регионально климата. В XXI веке появились исследования по влиянию на качество городского воздуха мощных аэрозольных выбросов при разрушении зданий, а также уменьшения аэрозольного загрязнения при снижении экономической активности. В данном обзоре описываются основные источники и типы городского аэрозоля, его оптические и радиационные свойства, влияние на качество городского воздуха.

**Ключевые слова.** Источники и типы аэрозоля, оптические и радиационные свойства, урбанизированные территории.

## The impact of urban aerosol on climate processes and air quality

*A.S. Ginzburg<sup>1)\*</sup>, Yu.O. Shuvalova<sup>2)</sup>, S.A. Dokukin<sup>1)</sup>, N.D. Tikhonenko<sup>3)</sup>*

<sup>1)</sup> Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences,  
3, bld. 1, Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russian Federation

<sup>2)</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
11-13, Bolshoy Predtechensky Lane, Moscow, 123242, Russian Federation

**Abstract.** Atmospheric aerosol pollution has a significant impact on meteorological and climatic processes and air quality in urban agglomerations. Urban aerosol is mainly formed from emissions from industrial and energy enterprises, transport, and waste incineration. Despite a slight decrease in aerosol emissions in many megacities of the world in recent decades, aerosol forcing plays a significant role in shaping the urban and regional climate. In the 21<sup>st</sup> century, studies have appeared on the effects of powerful aerosol emissions from the destruction of buildings, as well as reducing aerosol pollution with reduced economic activity on urban air quality. This review describes the main types of urban aerosol, its optical and radiation properties, methods and results of accounting for the aerosol factor in various mesoscale climate models.

**Keywords.** Aerosol sources and types, optical and radiation properties, urbanized territories, mesoscale climate models, air quality.

## Введение: аэрозоль и его климатические эффекты

Аэрозоль (взвешенные в атмосфере твердые и/или жидкие частицы размером от долей до десятков микрон) в зависимости от состава частиц, их размера, формы и оптических свойств, а также расположения (высоты и толщины) аэрозольного слоя оказывает различные (иногда противоположные) воздействия на радиационный и термический режим климатической системы (IPCC, 2023). Различные типы аэрозоля воздействуют на процессы облако- и осадкообразования путем изменения микроструктуры облачных частиц. На глобальные и мезомасштабные метеорологические и климатические процессы заметное воздействие оказывают аэрозольные частицы фотохимического смога, дым от лесных, нефтяных и промышленных пожаров, крупные пылевые выносы, продукты вулканических извержений. В городских условиях аэрозоль преимущественно образуется из выбросов предприятий промышленности и энергетики, транспорта, при сжигании мусора, дорожных и строительных работ. Отдельно надо отметить аэрозольные выбросы от сноса устаревших зданий и построек, а также городские пожары различного происхождения. Цель данного обзора – кратко суммировать современные знания об основных источниках и типах городского аэрозоля, его оптических и радиационных свойствах и влиянии на климатические процессы и качество городского воздуха, а также обратить внимание на особые случаи резкого изменения городской аэрозольной нагрузки.

Аэрозоль можно классифицировать по происхождению, источникам, компонентному и химическому составу, размеру, гигроскопичности (гидрофобный и гидрофильный), поглощательной способности, высоте (тропосферный и стратосферный), географической локации. По происхождению выделяют первичный аэрозоль, попадающий в атмосферу из природных или

антропогенных источников, и вторичный аэрозоль, образующийся в атмосфере путем химических реакций (Tomasi, Lupi, 2017). Механизм образования природного вторичного аэрозоля и его влияние на окружающую среду детально рассмотрены в работе (Petaejae et al., 2022) на примере бореального леса.

По химическому составу выделяют сульфатный, нитратный, углеродсодержащий и морской (хлорсодержащий) аэрозоль. В зависимости от региона выделяют морской, континентальный, сельский, городской и пустынный аэрозоль. По размеру различают мелкодисперсный (диаметром менее 1 мкм) и грубодисперсный (диаметром более 1 мкм) аэрозоль. Мелкодисперсный аэрозоль разделяют на нуклеационную моду (менее 100 нм) и коагуляционную (субмикронную) моду (от 100 до 1000 нм). Однако анализ массовых концентраций аэрозоля наиболее часто проводится для взвешенных частиц PM (particle matter) диаметром менее 2.5 мкм (PM<sub>2.5</sub>) и диаметром менее 10 мкм (PM<sub>10</sub>). В первую очередь, такое деление связано с медицинскими исследованиями о способности частиц проникать в верхние дыхательные пути и кровоток (Sharma et al., 2020).

Влияние аэрозоля на климатические процессы определяется, в первую очередь, его оптическими характеристиками: оптической толщиной аэрозоля (aerosol optical depth – AOD), альбедо однократного рассеяния (single scattering albedo – SSA) и фактором асимметрии индикатрисы рассеяния (asymmetry factor – ASY). Взаимодействие радиации и аэрозоля описывается теорией Ми (Liou, 2002), которая представляет рассеяние света в приближении сферических частиц с размером, сопоставимым с длиной волны рассеиваемого света. AOD является главной оптической характеристикой, она определяет долю прямого солнечного излучения, не достигающего поверхности Земли. AOD сильно зависит от климатического региона, сезона и метеорологических условий. Оптическая толщина аэрозоля в мире составляет от тысячных долей целого до нескольких единиц, причем наиболее высокие AOD наблюдаются в городах и в среднем за месяц наблюдений могут превышать 1 (Zheng et al., 2017). Альбедо однократного рассеяния аэрозоля характеризует долю поглощенного частицей излучения. SSA является характерной величиной типа аэрозоля, так как зависит от происхождения частиц, их возраста и растворимости (Li et al., 2022). По поглощательной способности выделяют непоглощающий ( $\omega \approx 1$ ), слабопоглощающий ( $\omega \approx 0.95-0.99$ ) и сильнопоглощающий аэрозоль ( $\omega \approx 0.85-0.95$ ).

Рассеяние электромагнитного излучения на частицах аэрозоля неравномерно, поэтому дополнительно вводится индикатриса рассеяния, которая определяет угловое распределение интенсивности рассеяния. При взаимодействии света с частицами аэрозоля важным оказывается «вытянутость» индикатрисы вперед, что удобнее учесть с помощью фактора асимметрии индикатрисы рассеяния (ASY). Таким образом, ASY отражает асимметрию в угловом распределении рассеянного излучения.

Как правило, наличие в атмосфере аэрозоля приводит к понижению приземной температуры воздуха. Отрицательный (охлаждающий) эффект может

наблюдаться после мощных вулканических извержений и пылевых бурь (Marshall et al., 2022), а также при сильном задымлении атмосферы (особенно верхней тропосферы и нижней стратосферы) в результате природных и нефтяных пожаров (Kirsanov et al., 2020), гипотетической «ядерной зимы» (Гинзбург, Лебедев, 2025; Ginzburg, Samoylovskaya, 2024). Однако попадание сильнопоглощающего аэрозоля, например, сажи на подстилающую поверхность и в приземный слой атмосферы, приводит к некоторому потеплению (положительный эффект) за счет усиления поглощения солнечного излучения (Chubarova et al., 2024). Этим вопросам посвящено огромное количество исследований и публикаций, здесь упомянуты только некоторые статьи последних лет.

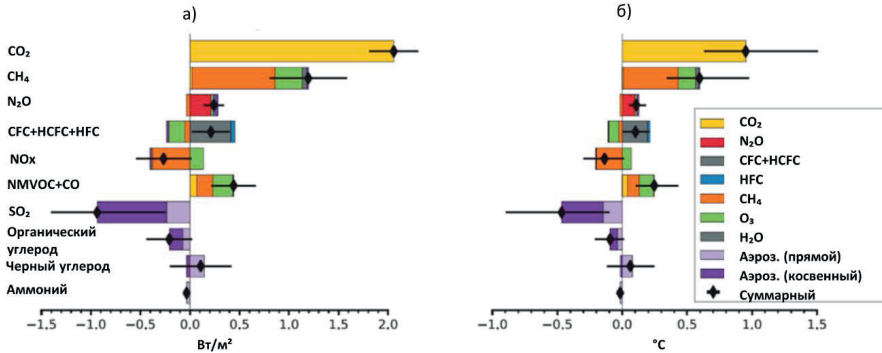
Воздействие аэрозоля на атмосферные процессы обычно подразделяется на прямое и косвенное. Прямое воздействие заключается в том, что аэрозоли рассеивают и поглощают солнечное и тепловое излучение и тем самым изменяют радиационный баланс атмосферы и подстилающей поверхности. Наибольшее прямое воздействие на потоки солнечного и теплового излучения в атмосфере оказывают аэрозоли, содержащие сульфаты, органический углерод и сажу, которые образуются от сжигания топлива и биомассы, а также пыль, попадающая в атмосферу в результате природных процессов и хозяйственной деятельности. Косвенное воздействие аэрозоля заключается в зависимости концентрации и размера облачных капель от концентрации аэрозоля и его физико-химических свойств. С ростом концентрации ядер конденсации увеличивается концентрация облачных капель и снижается размер капель, из-за чего альbedo облаков и время жизни облака увеличиваются.

Основной характеристикой прямого воздействия аэрозоля на радиационный баланс планеты является аэрозольный радиационный эффект (ARE, Aerosol Radiative Effect). ARE определяется как разность радиационного баланса на верхней границе атмосферы в присутствии аэрозоля и без него. ARE – самая «строгая» характеристика влияния аэрозоля на климатическую систему, так как описывает эффект наличия аэрозоля в атмосфере в целом, а не отдельных его видов. Однако чаще исследователями рассматривается аэрозольное радиационное воздействие (ARF, Aerosol Radiative Forcing). ARF представляет собой изменение разности радиационных балансов на уровне тропопаузы, связанное с изменением содержания аэрозоля в рассматриваемый период (современная эпоха) по сравнению с содержанием аэрозоля в так называемый «доиндустриальный период». Рубежом начала индустриального периода считают 1750 год. На рис. 1 представлено эффективное (кумулятивное) ARF и соответствующее ему изменение приземной температуры воздуха в период 1750-2019 гг., по данным оценок Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2021).

ARF аэрозоля сравним с вкладом малых газовых составляющих в изменение радиационного баланса и приземной температуры воздуха. По глобальным оценкам отрицательный эффект всего аэрозоля превалирует над положительным эффектом аэрозоля. Основным источником положительного ARF является черный углерод. Большую неопределенность в оценки также

---

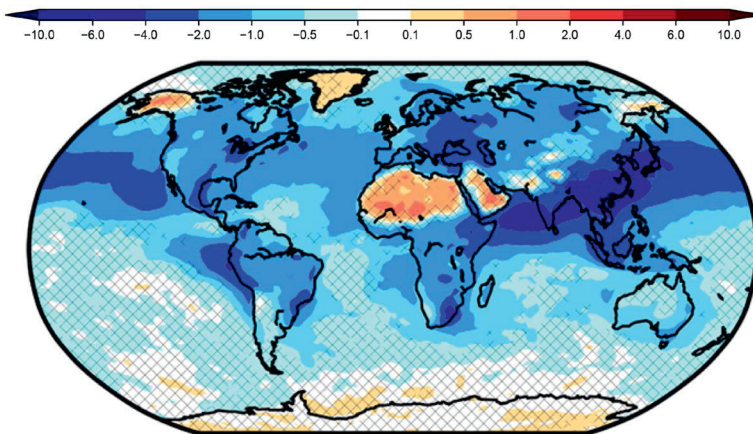
вносит непрямой эффект аэрозоля. Согласно более ранним исследованиям МГЭИК, суммарное радиационное воздействие аэрозоля по результатам наблюдений составляет от  $-0.4$  до  $-0.8$  Вт/м<sup>2</sup>, причем из них на сульфатный аэрозоль приходится  $-0.4 \pm 0.2$  Вт/м<sup>2</sup>, на сажевый –  $+0.2 \pm 0.15$  Вт/м<sup>2</sup>, на нитратный –  $-0.1 \pm 0.1$  Вт/м<sup>2</sup>, на пылевой –  $\pm 0.2$  Вт/м<sup>2</sup> (IPCC, 2007).



**Рисунок 1.** Эффективное радиационное воздействие (а) и изменение глобальной приземной температуры воздуха (б) за счет изменения содержания в атмосфере парниковых газов и аэрозоля (прямой и косвенный эффекты) в период с 1750 по 2019 годы  
*Рисунок адаптирован из (IPCC, 2021)*

**Figure 1.** Effective radiative forcing (a) and global surface temperature change (b) due to the change of greenhouse gases and aerosol content (direct and indirect effects) for 1750-2019  
*The figure is adapted from (IPCC, 2021)*

Ансамблевый прогноз моделей CMIP6 показал, что ARF в среднем по планете составляет от  $-0.63$  Вт/м<sup>2</sup> до  $-1.37$  Вт/м<sup>2</sup>, в зависимости от модельной реализации. ARF имеет значимое охлаждающее влияние практически во всех регионах планеты, за исключением Сахары, Аравийского полуострова, Гренландии и Аляски (рис. 2).



**Рисунок 2.** Эффективное аэрозольное радиационное воздействие, по данным мультимодельного ансамбля CMIP6  
*Рисунок адаптирован из (Smith et al., 2020)*

**Figure 2.** Effective aerosol radiative forcing according to the CMIP6 multi-model data  
*The figure is adapted from (Smith et al., 2020)*

Несмотря на то, что климатические эффекты атмосферного аэрозоля активно изучаются уже многие десятилетия, большое разнообразие видов аэрозоля приводит к тому, что наши знания об этих эффектах ещё довольно фрагментарны и требуют постоянного уточнения и развития. В городских условиях оценка влияния аэрозоля на климатические характеристики особенно трудна в силу наличия множества локальных источников аэрозольных частиц, особенностей их переноса и жизненного цикла в условиях городской застройки. В этой ситуации оценка полноты знаний о влиянии городского аэрозоля на региональные климатические и погодные процессы представляется очень важной и своевременной.

### **Основные характеристики городского аэрозоля**

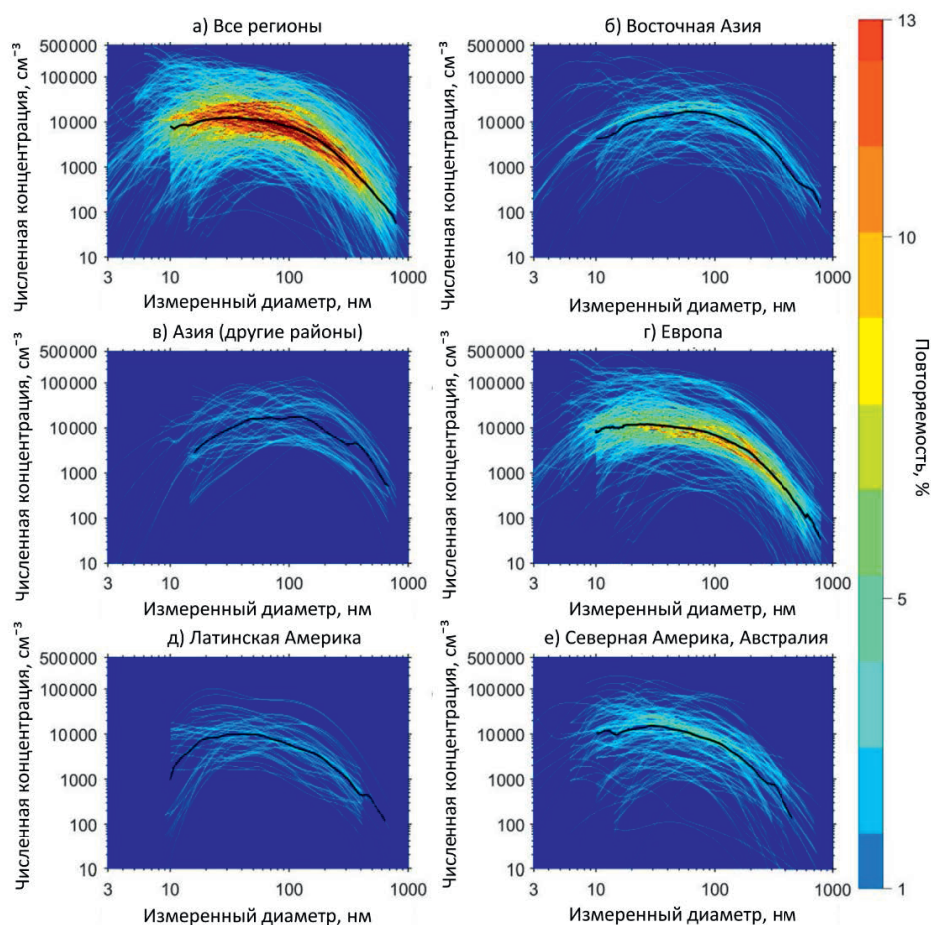
Городской аэрозоль представляет особый интерес для изучения, так как оказывает значимое воздействие на особенности атмосферной стратификации и циркуляции в городе, а также на облачность и осадки. В урбанизированных районах концентрация аэрозоля выше, чем за их пределами, что связано, в первую очередь, с антропогенными источниками. Состав городского аэрозоля зависит от географического положения города, рассматриваемого сезона, плотности населения, высотности застройки, транспортных потоков и т.д. (Guerreiro et al., 2014).

Если рассматривать год в целом, городской аэрозоль способствует снижению интенсивности городского острова тепла (Urban Heat Island, UHI) (Wu et al., 2017). Однако летом и зимой механизмы отличаются. В летний период наблюдается пространственное различие в суммарной радиации у земной поверхности в городе и за его пределами, т.к. содержание аэрозоля в городе выше. Таким образом, городская загрязненная среда недополучает тепло относительно сельских условий, что ослабляет UHI (Han et al., 2020). В зимний период данный механизм незначим. Зимой пространственные градиенты температуры и интенсивность перемешивания снижаются, что повышает устойчивость планетарного пограничного слоя. Наблюдается более интенсивное накопление тепла в городах, UHI усиливается (Han et al., 2020).

Более высокая концентрация аэрозоля в городах также приводит к тому, что размер облачных капель снижается. С одной стороны, это способствует увеличению времени жизни облаков. Тогда осадкообразование подавляется или, правильнее будет сказать, «откладывается», т.е. наблюдается пространственное перераспределение осадков. С другой стороны, скрытое тепло конденсации усиливает восходящие потоки воздуха. Это приводит к росту водности облаков и увеличивает шансы развития конвективной облачности смешанной фазы. В результате увеличивается количество осадков в подветренной части города (Han et al., 2012). В отличие от оптических свойств и массовых концентраций аэрозоля, размер частиц измеряется намного реже и в течение коротких периодов, поэтому таких данных для городского аэрозоля мало.

Как правило, распределение городского аэрозоля по размерам бимодальное (Wu, Boor, 2021). Городской аэрозоль представлен преимущественно мел-

кодисперсными частицами. На рис. 3 представлены распределения по размерам городского мелкодисперсного аэрозоля, по данным измерений в разных регионах мира. Формы распределений сильно отличаются, но в них часто преобладает нуклеационная мода, важным источником которой в городской среде служит автотранспорт. Можно также отметить, что в городах Европы, Северной Америки, Австралии и Новой Зеландии медиана диаметра аэрозоля ниже, чем в Азиатских городах.



**Рисунок 3.** Повторяемость (в %) распределений городского мелкодисперсного аэрозоля по размерам для различных регионов планеты: а) все регионы; б) Восточная Азия; в) Центральная, Южная и Юго-Восточная Азия; г) Европа; д) Латинская Америка; е) Северная Америка, Австралия и Новая Зеландия

*Рисунок адаптирован из (Wu, Boor, 2021). Черной линией показано медианное распределение*

**Figure 3.** Occurrence' (%) of size distributions of the urban fine aerosol for different geographical regions: а) all regions; б) East Asia; в) Central, South and Southeast Asia; д) Europe; е) Latin America; ф) North America, Australia and New Zealand

*The figure is adapted from (Wu, Boor, 2021). The black line shows the median distribution*

Основными антропогенными источниками взвешенных частиц в атмосфере города являются автотранспорт, промышленный сектор, продукты теплоэнергетики и сжигания мусора (Черногаева и др., 2019). Эмиссии от

автотранспорта, помимо основных компонентов (углекислый газ, угарный газ, оксиды азота, серные соединения), содержат сажу и пыль. Эмиссии от промышленных предприятий зависят от вида деятельности. Эмиссии от металлургических и цементных заводов обычно включают углеродсодержащий аэрозоль, пыль, тяжелые металлы и органические соединения.

Органические вещества являются основным компонентом РМ. Однако в городской среде это не всегда выполняется. По данным исследований взвешенных частиц РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>2.5</sub> в городах Европы, иногда преобладают минеральная пыль, нитратный и морской аэрозоли (Putaud et al., 2008).

Сульфатный аэрозоль – гидрофильный и непоглощающий, однако он смешивается с другими компонентами, что может изменять его оптические свойства (Myhre et al., 2013). Независимо от уровня урбанизации, сульфатный аэрозоль вносит значимый вклад в AOD в течение всего года (Ji et al., 2025). В городских условиях сульфатный аэрозоль, как правило, представлен мелкодисперсными частицами, которые образуются из соединений серы путем химических реакций (Middleton et al., 1980). Сульфатный аэрозоль (вместе с нитратным) часто занимает второе место в химическом составе городского аэрозоля (Lanz et al., 2010; Xu et al., 2014).

Пылевой аэрозоль попадает в атмосферу за счет эрозии почв, сельскохозяйственной деятельности, работы транспортной системы и промышленного производства (Vinogradova et al., 2024). Важным и мощным локальным источником крупнодисперсного пылевого аэрозоля в городах являются залповые выбросы пыли при разрушении зданий в ходе строительных работ, при ремонте дорог и т.п. (Gubanova et al., 2025). Антропогенная минеральная пыль в основном состоит из мелкодисперсных частиц. Типичные значения альбедо однократного рассеяния пылевой компоненты составляют от 0.90 до 0.99, поэтому оценить его суммарный климатический эффект нелегко. Антропогенный пылевой аэрозоль, в отличие от природного, содержит тяжелые металлы и металлоиды (Gubanova et al., 2025).

Нитратный аэрозоль представлен мелкодисперсной фракцией и образуется в атмосфере при избытке аммония, поэтому его концентрации велики в индустриально развитых районах. Он тоже является непоглощающей аэрозольной компонентой, однако его вклад в ослабление солнечного излучения невелик по сравнению с другими аэрозольными компонентами (рис. 1). Исследования нитратного аэрозоля связаны с его гидрофильностью, из-за чего частицы служат ядрами конденсации при образовании городской дымки в период накопления примесей в атмосфере (Sun et al., 2018).

Сажевый аэрозоль является основным загрязнителем атмосферы. Он выделяется при неполном сгорании топлива, в процессе горения лесов и сельскохозяйственных полей (Bond et al., 2013). Сажевый аэрозоль – нерастворимая, поглощающая компонента, и его поглощательные свойства ослабевают с увеличением времени нахождения в атмосфере. Так, например, именно с увеличением доли содержания в атмосфере сажевых частиц связана общая тенденция роста поглощательной способности аэрозоля в видимой области спектра при наблюдающемся суммарном снижении загрязнения и аэрозоль-

ной оптической толщины (Putaud et al., 2014). От вклада сажи в AOD и SSA зависит и суммарное радиационное воздействие аэрозоля. В городской среде основным источником сажи является автотранспорт (Koreikin, Ponomareva, 2021), а бытовые источники и теплоэнергетика имеют второстепенное значение. Последние годы прослеживается тенденция очищения городского воздуха от сажевого аэрозоля (Savadkoohi et al., 2023).

В городской среде аэрозольная оптическая толщина (AOD) и ее пространственно-временная изменчивость, в первую очередь, обуславливается климатическими условиями регионов, определяющими основные аэрозольные компоненты. В табл. 1 представлены AOD некоторых крупных городов мира, измеренные в интервале длин волн 500-558 нм. Особо высокие осредненные значения AOD связаны с уровнем антропогенного загрязнения города, например, в Пекине, Буэнос-Айресе или Мехико. Альбе́до однократного рассеяния, по данным измерений, в большинстве случаев колеблется от 0.80 до 0.99, в том числе и в городской среде (Gong et al., 2017).

**Таблица 1.** Аэрозольная оптическая толщина в некоторых крупных городах мира  
**Table 1.** Aerosol optical depth in some major cities of the world

| Регион        | Период             | AOD       | Источники                      |
|---------------|--------------------|-----------|--------------------------------|
| Москва        | 2003-2023          | 0.11-0.20 | Петров, Чубарова, 2024         |
| Екатеринбург  | 2010,<br>2013-2017 | 0.138     | Luzhetskaya,<br>Poddubny, 2020 |
| Города Польши | 2011-2019          | 0.14-0.17 | Markowicz et al.,<br>2021      |
| Лос-Анджелес  | 2001-2015          | 0.151     | Wang et al., 2017              |
| Мехико        | 2019               | 0.31±0.12 | Carabali et al., 2021          |
| Буэнос-Айрес  | 2014               | 0.35±0.31 | Della Ceca et al.,<br>2017     |
| Пекин         | 2018-2023          | 0.28-0.46 | Peng et al., 2025              |

В XXI веке по спутниковым данным и наземным наблюдениям отмечается тенденция уменьшения антропогенных выбросов в атмосферу над многими регионами земного шара (Van Donkelaar et al., 2014). Тренды во многом связаны с ростом качества топлива, модернизацией промышленных и перерабатывающих предприятий. Однако в густонаселенных регионах тенденции различны. В Европе и Северной Америке AOD снижается, преимущественно, весной и летом (Paulot et al., 2018). Это связывают со значимым сокращением эмиссий диоксида серы. В Индии и Китае тренды AOD приходятся на холодный период и связаны с изменениями в антропогенных эмиссиях углеродсодержащего аэрозоля и соединений азота, из которых в атмосфере образуется вторичный нитратный аэрозоль.

Многие исследователи отмечают общую тенденцию очищения атмосферы и в Московском регионе (Golitsyn et al., 2015), даже в условиях роста эмиссий от автотранспорта (Черногаева и др., 2019). Автотранспорт является

основным источником (85%) «городской» сажи в Москве (Koreikin, Ronomareva, 2021). Транспортная активность населения Москвы вносит большой вклад в химический состав загрязняющих веществ в городе (Vlasov et al., 2023), особенно – тяжелых металлов. В Московском регионе, по данным наблюдений, отмечается тенденция снижения содержания мелкодисперсного аэрозоля и рост поглотительной способности аэрозоля (Жданова и др., 2017). Взвешенные частицы в Московском регионе более чем на 60% представлены мелкодисперсным слабопоглощающим аэрозолем (Zhdanova et al., 2019). Но даже для такого большого мегаполиса, как Москва, эффекты пространственной неоднородности в пределах города невелики: по данным спутниковых измерений, различия AOD составляют всего 0.02-0.04 (Zhdanova et al., 2020).

Основной тенденцией последних лет в исследованиях аэрозольного загрязнения городов стало использование количественных показателей качества воздуха (AQI – Air Quality Index). Удобство использования AQI состоит в их понятности и расширяемости. AQI не зависят от временного масштаба и могут учитывать региональные особенности критериев «чистого» и «загрязненного» воздуха (Mandal, Gorai, 2014). Без учета непостоянства и неравномерности антропогенных источников, показатели качества приземного воздуха могут опираться на неблагоприятные метеорологические условия (НМУ), которые способствуют накоплению примесей в планетарном пограничном слое атмосферы. Так в работе (Ткачева и др., 2022) представлен метеорологический параметр рассеивания загрязнения (МПРЗ), который зависит от барического поля, скорости ветра в пограничном слое, осадков и стратификации атмосферы. Такие индексы, как МПРЗ, могут применяться в регионах, где наблюдения за загрязняющими веществами не проводятся. Отдельно следует отметить важность НМУ в исследованиях городского аэрозоля. Прогноз НМУ в мегаполисах (<https://mosecom.mos.ru/>) имеет такое же значение, как и стратегия по снижению антропогенных выбросов. Например, в многочисленных исследованиях городского загрязнения отмечается тесная связь скорости приземного ветра и температурной стратификации атмосферы с концентрациями загрязняющих веществ (Kim et al., 2023; Кузнецова и др., 2014).

Проблема оценки аэрозольного влияния в городской среде, по данным наблюдений, состоит в том, что исследования часто проводятся в отдельных городах, что не дает полного представления об эффектах аэрозоля из-за географических и климатических различий.

### **Воздействие городского аэрозоля на качество воздуха и здоровье населения**

Одна из мало исследованных областей науки в контексте городского загрязнения атмосферы – влияние аэрозольного загрязнения на здоровье населения. В целом, уровень загрязнения воздуха снижается во многих регионах планеты. Однако, согласно анализу Всемирной организации здравоохранения, более 90% населения планеты до сих пор проживает в регионах, в которых уровень загрязнения достаточно высок для проявления негативного эффекта на

здоровье (WHO, 2021). Спектр воздействия взвешенных частиц в атмосфере на здоровье велик. Большинство вариантов токсического воздействия аэрозоля на организм подчиняется механизму окислительного стресса, который связан с кислородным дисбалансом на клеточном уровне. Окислительный стресс, в свою очередь, запускает цепочку воспалительных процессов в организме.

Важно также отметить, что токсичность РМ увеличивается при уменьшении размера частиц, поэтому негативный эффект от РМ<sub>2,5</sub> сильнее, чем от РМ<sub>10</sub>. Попадая в кровоток через альвеолы легких, РМ<sub>2,5</sub> способны распространяться и воздействовать на ткани и клетки всего организма. К токсичным компонентам аэрозоля относят металлы, органическое вещество и сажу (Contoni et al., 2021).

Между тем, даже крупные частицы аэрозоля (например, РМ<sub>10</sub>) способны проникать в бронхи и оседать на их поверхности. Частицы воздействуют на эпителий бронхов напрямую, разрушая его, или же вызывают нарушение иммунной регуляции. Оба механизма связаны с развитием астмы (Bronte-Moreno et al., 2023). Иммунный ответ усиливается, если вместе с РМ наблюдается токсическое воздействие на организм озона или диоксида азота. Вследствие воздействия РМ на легкие также может развиваться хроническая обструктивная болезнь легких.

Ишемическая болезнь сердца (ИБС) является одной из наиболее частых причин инвалидизации и смертности населения. РМ<sub>2,5</sub> через альвеолы легких попадают в кровоток, вызывая сужение артериальных сосудов, что приводит к развитию ИБС. Зависимость степени воздействия от концентрации РМ нелинейная, еще при низких концентрациях наблюдается быстрый рост негативного воздействия на организм (Montone et al., 2023).

О влиянии загрязненного аэрозолем воздуха на центральную нервную систему (ЦНС) задумались намного позднее относительно других воздействий (Oberdoerster, Utell, 2002). В результате большого числа исследований обнаружено, что высокое содержание РМ способно нарушать циркадные ритмы и усугублять симптомы некоторых психических расстройств, таких как шизофрения и депрессия (Vuoli et al., 2018). Исследования также показывают возможную связь аутизма и синдрома дефицита внимания и гиперактивности у детей с воздействием высоких концентраций РМ на организм беременной женщины. В целом, негативное воздействие аэрозоля на ЦНС вызвано двумя факторами. Во-первых, при хроническом влиянии загрязняющих веществ на сердечно-сосудистую систему возникают негативные риски для ЦНС. Во-вторых, мелкодисперсные частицы способны проникать непосредственно в ЦНС и активировать там врожденные иммунные реакции (Genc et al., 2012).

Выраженный негативный эффект на здоровье у людей с аллергией имеет пыльца растений. Первый пик аллергических реакций (поллиноз) проходит в весенний период во время цветения некоторых деревьев: березы, ольхи, клена, ясеня, тополя. Второй пик поллиноза приходится на первую половину лета в период цветения злаковых растений (тимофеевка, пырей и т.д.). Третий пик связан с цветением сорных трав (полынь, лебеда, амброзия, крапива) во второй половине лета и в начале осени. Хотя пыльца растений не является продуктом антропогенной деятельности, город способен усугублять аллергическую реак-

цию на пыльцу сразу по ряду причин. Во-первых, концентрация аллергенов в городском воздухе может быть выше ввиду особенностей циркуляции воздуха (например, в ветреную и сухую погоду). Во-вторых, антропогенная деятельность способна усиливать аллергенные свойства пыльцы. Исследованиями установлено, что аллергенность пыльцы повышается из-за использования азотсодержащих удобрений в сельском хозяйстве (Daelemans et al., 2025). Под влиянием РМ в городской среде обнаружены структурные изменения белка пыльцы, повышающие ее аллергические свойства (Stawoska et al., 2023).

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) отмечает, что многие возможные негативные эффекты городского загрязнения атмосферы на здоровье населения до сих пор не изучены, например, неврологические эффекты на развитие детей, влияние на метаболизм человека, частоту раковых заболеваний и т.д. (WHO, 2021). Таким образом, мониторинг качества воздуха стал не только задачей метеорологии и климатологии, но и необходимым звеном медицинских исследований.

Особым аэрозольным эффектом в городских условиях стало заметное уменьшение содержания различных антропогенных аэрозолей в атмосфере многих мегаполисов мира в силу резкого снижения экономической активности весной 2020 г. во время пандемии COVID-19, см. (Гинзбург и др., 2020; Sokhi et al.; Шувалова, Гинзбург, 2024) и множество других публикаций.

## **Заключение**

Исследования влияния различных типов аэрозоля на климатические процессы глобального и локального масштабов позволяют оценить вклад антропогенного аэрозольного воздействия на характеристики городского климата и качества воздуха в больших городах. В XXI веке в экономически развитых урбанизированных регионах, в том числе и в московском мегаполисе, отмечаются тенденции снижения аэрозольной антропогенной нагрузки.

Важнейшим новым направлением исследований является анализ воздействия атмосферного аэрозоля, в том числе выбросов пыли при разрушении зданий в ходе строительных работ, а также уменьшения аэрозольного загрязнения в силу экологически ориентированного развития экономики или, например, во время снижения экономической активности во время пандемии COVID-19, на качество воздуха и здоровье населения.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН № 125021001827-3 и Научно-исследовательской работы Росгидромета РФ № 125032004255-7.*

## **Список литературы**

Гинзбург, А.С., Лебедев, М.А. (2025) К семидесятилетию Манифеста Рассела-Эйнштейна. Климат и экология в фокусе Пагуошского движения ученых, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 3, с. 287-315.

---

Гинзбург, А.С., Семенов, В.А., Семутникова, Е.Г., Алешина, М.А., Захарова, П.В., Лезина, Е.А. (2020) Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве, *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, т. 495, № 1, с. 73-78.

Жданова, Е.Ю., Локощенко, М.А., Богданович, А.Ю., Горбаренко, Е.В., Сошинская, И.В., Шиловцева, О.А., Незваль, Е.И., Чубарова, Н.Е., Хлестова, Ю.О., Еремина, И.Д., Северова, Е.Э., Волкова, О.А., Полевова, С.В., Комаров, А.Ю., Селиверстов, Ю.Г., Сократов, С.А., Гребенников, П.Б., Казарова, С.Ю., Купцов, С.В., Бойко, Г.А., Лаврова, Т.В., Ванина, Л.С., Авилова, К.В. (2017) *Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2016 г., по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова*, под редакцией Е.И. Незваль, И.В. Сошинской, М., МАКС Пресс, 245 с.

Кузнецова, И.Н., Шалыгина, И.Ю., Нахаев, М.И., Глазкова, А.А., Захарова, П.В., Лезина, Е.А., Звягинцев, А.М. (2014) Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы, *Труды Гидрометцентра России*, т. 351, с. 154-172.

Петров, Н.А., Чубарова, Н.Е. (2024) Оценка влияния парниковых газов и атмосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию для условий безоблачного неба, *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, т. 79, № 6, с. 15-29.

Ткачева, Ю.В., Кузнецова, И.Н., Нахаев, М.И. (2022) Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, т. 385, № 3, с. 161-177.

Черногаева, Г.М., Жадановская, Е.А., Малеванов, Ю.А. (2019) Источники загрязнения и качество атмосферного воздуха Московского региона, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 2, с. 109-116.

Шувалова, Ю.О., Гинзбург, А.С. (2024) Качество воздуха в Москве во время карантина COVID-19 в сравнении с другими регионами мира, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 70-81.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, no. 11, pp. 5380-5552.

Bronte-Moreno, O., Francisco-Javier, G.-B., Muñoz-Gall, X., Pueyo-Bastida, A., Ramos-González, J., Urrutia-Landa, I. (2023) Impact of air pollution on asthma: a scoping review, *Open Respiratory Archives*, vol. 5, no. 2, p. 100229.

Buoli, M., Grassi, S., Caldiroli, A., Carnevali, G.S., Mucci, F., Iodice, S., Cantone, L., Pergoli, L., Bollati, V. (2018) Is there a link between air pollution and mental disorders? *Environment international*, vol. 118, pp. 154-168.

Carabali, G., Villanueva-Macias, J., Ladino, L.A., Álvarez-Ospina, H., Raga, G.B., Andraca-Ayala, G., Miranda, J., Grutter, M., Silva, M.M., Riveros-Rosas, D.

(2021) Characterization of aerosol particles during a high pollution episode over Mexico City, *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 22533.

Ceca, L.S.D., Micheletti, M.I., Piacentini, R.D. (2017) Atmospheric Particulate Matter Variability during 2014 at Buenos Aires City (Argentina) Comparing Ground-Based Measurements and Satellite Data, In *Proceedings*, vol. 1, no. 5, p. 180.

Chubarova, N.E., Vogel, H., Androsova, E.E., Kirsanov, A.A., Popovicheva, O.B., Vogel, B., Rivin, G.S. (2024) Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 22, pp. 10443-10466.

Contoni, D., Lin, Y.-H., Haenninen, O., Viana, M. (2021) Contribution of aerosol sources to health impacts, *Atmosphere*, vol. 12, no. 6, p. 740.

Daelemans, R., Verscheure, P., Rombouts, T., Keyzers, S., Devriese, A., Peeters, G., Coorevits, L., Frans, G., Van Gerven, L., Bruffaerts, N., Honnay, O. (2025) The impact of ecosystem nitrogen enrichment on pollen allergy: a cross-sectional paired comparison study, *The Lancet Planetary Health*, vol. 9, no. 4, pp. e294-e303.

Genc, S., Zadeoglulari, Z., Fuss, S.H., Genc, K. (2012) The adverse effects of air pollution on the nervous system, *Journal of toxicology*, no. 1, p. 782462.

Ginzburg, A.S., Samoylovskaya, N.A. (2024) The “Nuclear winter” hypothesis and a responsible nuclear policy, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 94, no. 3, pp. 107-113.

Golitsyn, G.S., Grechko, E.I., Dzhola, A.V., Emilenko, A.S., Kopeikin, V.M., Rakitin, V.S., Safronov, A.N., Fokeeva, E.V., Wang, G., Wang, P. (2015) Studying the pollution of Moscow and Beijing atmospheres with carbon monoxide and aerosol, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 51, no. 1.

Gong, C., Xin, J., Wang, S., Wang, Y., Zhang, T. (2017) Anthropogenic aerosol optical and radiative properties in the typical urban/suburban regions in China, *Atmospheric Research*, vol. 197, pp. 177-187.

Gubanova, D.P., Ginzburg, A.S., Vinogradova, A.A., Chkhetiani, O.G., Semenov, V.A. (2025) The “dust haze” effect in the atmosphere of a megapolis, *Doklady Earth Sciences*, vol. 522, no. 1, pp. 1-8.

Guerreiro, C.B.B., Foltescu, V., De Leeuw, F. (2014) Air quality status and trends in Europe, *Atmospheric environment*, vol. 98, pp. 376-384.

Han, J.Y., Baik, J.J., Khain, A.P. (2012) A numerical study of urban aerosol impacts on clouds and precipitation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 69, no. 2, pp. 504-520.

Han, W., Li, Z., Wu, F., Zhang, Y., Guo, J., Su, T., Maureen, C., Chen, T., Wei, J., Lee, S.-S. (2020) Opposite effects of aerosols on daytime urban heat island intensity between summer and winter, *Atmospheric Chemistry and Physics. Discussions*.

IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the*

---

*Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 p.

IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.

Ji, D., Palm, M., Buschmann, M., Ebell, K., Maturilli, M., Sun, X., Notholt, J. (2025) Hygroscopic aerosols amplify longwave downward radiation in the Arctic, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 25, no. 7, pp. 3889-3904.

Kim, C.H., Jo, H.Y., Jo, Y.J., Lee, H.J., Kim, J.M., Lee, N.M., Jeong, S.Y., Baek, S.H., Park, M.J., Chang, L.S., Lee, J.J. (2023) Synoptic meteorological conditions and contributing factors to air quality during the SIJAQ campaign, *Atmospheric Environment*, vol. 309, p. 119939.

Kirsanov, A.A., Rozinkina, I., Rivin, G., Zakharchenko, D., Olchev, A. (2020) Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia, *Atmosphere*, vol. 11, no. 10, p. 1133.

Kopeikin, V.M., Ponomareva, T.Ya. (2021) Dependence of variations in black carbon content in the atmosphere of Moscow on air mass transport direction, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 34, no. 1, pp. 74-80.

Lanz, V.A., Prévôt, A.S.H., Alfarra, M.R., Weimer, S., Mohr, C., DeCarlo, P.F., Gianini, M.F.D., Hueglin, C., Schneider, J., Favez, O., d'Anna, B. (2010) Characterization of aerosol chemical composition with aerosol mass spectrometry in Central Europe: an overview, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 21, pp. 10453-10471.

Li, J., Carlson, B.E., Yung, Y.L., Lv, D., Hansen, J., Penner, J.E., Liao, H., Ramaswamy, V., Kahn, R.A., Zhang, P., Dubovik, O., Ding, A., Lacis, A.A., Zhang, L., Dong, Y. (2022) Scattering and absorbing aerosols in the climate system, *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 3, no. 6, pp. 363-379.

Liou, K.N. (2002) *An introduction to atmospheric radiation*, Second Edition, Academic Press, Orlando, International Geophysics Series, vol. 84, 583 p.

Luzhetskaya, A.P., Poddubny, V.A. (2020) Specific features of time variations in aerosol optical depth in the middle urals using multiyear observations in urban and background regions, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 33, no. 2, pp. 172-178.

Mandal, T.K., Gorai, A.K. (2014) Air quality indices: a literature review, *Journal of Environmental Science and Engineering*, vol. 56, no. 3, pp. 357-362.

Markowicz, K.M., Stachlewska, I.S., Zawadzka-Manko, O., Wang, D., Kumala, W., Chilinski, M.T., Makuch, P., Markuszewski, P., Rozwadowska, A.K., Petelski, T., Zielinski, T. (2021) A decade of Poland-AOD aerosol research network observations, *Atmosphere*, vol. 12, no. 12, p. 1583.

Marshall, L.R., Maters, E.C., Schmidt, A., Timmreck, C., Robock, A., Toohey, M. (2022) Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues, *Bulletin of Volcanology*, vol. 84, no. 5, pp. 54.

Middleton, P., Kiang, C.S., Mohnen, V.A. (1980) Theoretical estimates of the relative importance of various urban sulfate aerosol production mechanisms, *Atmospheric Environment*, vol. 14, pp. 463-472.

Montone, R.A., Rinaldi, R., Bonanni, A., Severino, A., Pedicino, D., Crea, F., Liuzzo, G. (2023) Impact of air pollution on ischemic heart disease: evidence, mechanisms, clinical perspectives, *Atherosclerosis*, vol. 366, pp. 22-31.

Myhre, G., Samset, B.H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Bernsten, T.K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T., Easter, R.C. (2013) Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 4, pp. 1853-1877.

Oberdoerster, G., Utell, M.J. (2002) Ultrafine particles in the urban air: to the respiratory tract – and beyond? *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, no. 8, pp. A440-A441.

Paulot, F., Paynter, D., Ginoux, P., Naik, V., Horowitz, L.W. (2018) Changes in the aerosol direct radiative forcing from 2001 to 2015: observational constraints and regional mechanisms, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, no. 17, pp. 13265-13281.

Peng, S., Zheng, Y., Li, L., Gui, K., Zhu, J., Liu, S., Zhang, H., Zhao, H., Che, H., Zhang, X. (2025) Long-term variations in aerosol optical properties in Beijing: insights from diurnal and nocturnal continuous measurements, *Atmospheric Environment*, vol. 360, p. 121416.

Petaejae, T., Tabakova, K., Manninen, A., Ezhova, E., O'Connor, E., Moisseev, D., Sinclair, V.A., Backman, J., Levula, J., Luoma, K., Virkkula, A. (2022) Influence of biogenic emissions from boreal forests on aerosol-cloud interactions, *Nature Geoscience*, vol. 15, no. 1, pp. 42-47.

Putaud, J.P. (2008) The COST633 aerosol phenomenology, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, *European Commission*, vol. 23534.

Putaud, J.P., Cavalli, F., Martin's dos Santos, S., Dell'Acqua, A. (2014) Long-term trends in aerosol optical characteristics in the Po Valley, Italy, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 17, pp. 9129-9136.

---

Savadkoohi, M., Pandolfi, M., Reche, C., Niemi, J.V., Mooibroek, D., Titos, G., Green, D.C., Tremper, A.H., Hueglin, C., Liakakou, E., Mihalopoulos, N. (2023) The variability of mass concentrations and source apportionment analysis of equivalent black carbon across urban Europe, *Environment international*, vol. 178, p. 108081.

Sharma, S., Chandra, M., Kota, S.H. (2020) Health effects associated with PM<sub>2.5</sub>: a systematic review, *Current pollution reports*, vol. 6, pp. 345-367.

Smith, C.J., Kramer, R.J., Myhre, G., Alterskjær, K., Collins, W., Sima, A., Boucher, O., Dufresne, J.L., Nabat, P., Michou, M., Yukimoto, S. (2020) Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 20, no. 16, pp. 9591-9618.

Sokhi, R.S., et al. (2021) A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions, *Environment International*, vol. 157, p. 106818, doi:10.1016/j.envint.2021.106818.

Stawoska, I., Myszkowska, D., Oliwa, J., Skoczowski, A., Weselucha-Birczyńska, A., Saja-Garbarz, D., Ziemianin, M. (2023) Air pollution in the places of *Betula pendula* growth and development changes the physicochemical properties and the main allergen content of its pollen, *Plos one*, vol. 18, no. 1, p. e0279826.

Sun, J., Liu, L., Xu, L., Wang, Y., Wu, Z., Hu, M., Shi, Z., Li, Y., Zhang, X., Chen, J., Li, W. (2018) Key role of nitrate in phase transitions of urban particles: implications of important reactive surfaces for secondary aerosol formation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 123, no. 2, pp. 1234-1243.

Tomasi, C., Lupi, A. (2017) Primary and secondary sources of atmospheric aerosol, *Atmospheric aerosols: Life cycles and effects on air quality and climate*, Wiley, pp. 1-86.

Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Boys, B.L. (2014) Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter, *Environmental health perspectives*, vol. 123, no. 2, p. 135.

Vinogradova, A.A., Gubanova, D.P., Lezina, E.A., Ivanova, Yu.A. (2024) Dust aerosol from the Northern Caspian Sea regions in near-surface air in the center of European Russia, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 37, no. 5, pp. 620-629.

Wang, C., Wang, C., Myint, S.W., Wang, Z.H. (2017) Landscape determinants of spatio-temporal patterns of aerosol optical depth in the two most polluted metropolitans in the United States, *Science of the Total Environment*, vol. 609, pp. 1556-1565.

WHO (2021) *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide?* World Health Organization, available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (accessed 25 December 2025).

Wu, H., Wang, T., Riemer, N., Chen, P., Li, M., Li, S. (2017) Urban heat island impacted by fine particles in Nanjing, China, *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 1422.

Wu, T., Boor, B.E. (2021) Urban aerosol size distributions: a global perspective, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21, no. 11, pp. 8883-8914.

Xu, J., Zhang, Q., Chen, M., Ge, X., Ren, J., Qin, D. (2014) Chemical composition, sources, and processes of urban aerosols during summertime in northwest China: insights from high-resolution aerosol mass spectrometry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 23, pp. 12593-12611.

Zhdanova, E.Y., Chubarova, N.Y., Lyapustin, A.I. (2020) Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product, *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 13, no. 2, pp. 877-891.

Zhdanova, E.Yu., Khlestova, Yu.O., Chubarova, N.E. (2019) Trends in atmospheric aerosol characteristics in Moscow derived from multiyear AERONET measurements, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 32, pp. 534-539.

Zheng, C., Zhao, C., Zhu, Y., Wang, Y., Shi, X., Wu, X., Chen, T., Wu, F., Qiu, Y. (2017) Analysis of influential factors for the relationship between PM<sub>2.5</sub> and AOD in Beijing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 17, pp. 13473-13489.

## References

Ginzburg, A.S., Lebedev, M.A. (2025) K semidesyatiletuyu Manifesta Rassela-Eynshteyna. Klimat i ekologiya v fokuse Paguoshskogo dvizheniya uchenykh [On the Seventieth Anniversary of the Russell-Einstein Manifesto. Climate and Ecology in Focus of the Pugwash Movement of Scientists], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 11, no. 3, pp. 287-315.

Ginzburg, A.S., Semenov, V.A., Semutnikova, E.G., Aleshina, M.A., Zakharova, P.V., Lezina, E.A. (2020) Vliyaniye ogranicheniy, obuslovlennykh COVID-19, na kachestvo vozdukha v Moskve [The Impact of COVID-19 Restrictions on Air Quality in Moscow], *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle*, vol. 495, no. 1, pp. 73-78.

Zhdanova, E.Yu., Lokoshchenko, M.A., Bogdanovich, A.Yu., Gorbarenko, E.V., Soshinskaya, I.V., Shilovtseva, O.A., Nezval, E.I., Chubarova, N.E., Khlestova, Yu.O., Eremina, I.D., Severova, E.E., Volkova, O.A., Polevova, S.V., Komarov, A.Yu., Seliverstov, Yu.G., Sokratov, S.A., Grebennikov, P.B., Kazarova, S.Yu., Kuptsov, S.V., Boyko, G.A., Lavrova, T.V., Vanina, L.S., Avilova, K.V. (2017) *Ekologo-klimaticheskiye kharakteristiki atmosfery v 2016 g po dannym meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova* [Ecological and climatic characteristics of the atmosphere in 2016, according to the data of the meteorological observatory of Moscow State University named after M.V. Lomonosov], in E.I. Nezval, I.V. Soshinskaya (eds.), MAKS Press, Moscow, Russia, 245 p.

Kuznetsova, I.N., Shalygina, I.Yu., Nakhaev, M.I., Glazkova, A.A., Zakharova, P.V., Lezina, E.A., Zvyagintsev, A.M. (2014) Neblagopriyatnyye dlya kachestva vozdukha meteorologicheskiye faktory [Meteorological factors

unfavorable for air quality], *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia], vol. 351, pp. 154-172.

Petrov, N.A., Chubarova, N.E. (2024) Otsenka vliyaniya parnikovykh gazov i atmosfernogo aerolya na korotkovolnovuyu i dlinnovolnovuyu radiatsiyu dlya usloviy bezoblachnogo neba [Assessing the influence of greenhouse gases and atmospheric aerosol on shortwave and longwave radiation for cloudless sky conditions], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, vol. 79, no. 6, pp. 15-29.

Tkacheva, Yu.V., Kuznetsova, I.N., Nakhaev, M.I. (2022) Usovershenstvovannaya tekhnologiya prognoza meteorologicheskikh parametrov i usloviy, vliyayushchikh na zagryazneniye vozdukha [Improved technology for forecasting meteorological parameters and conditions affecting air pollution], *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, vol. 385, no. 3, pp. 161-177.

Chernogaeva, G.M., Zhadanovskaya, E.A., Malevanov, Yu.A. (2019) Istochniki zagryazneniya i kachestvo atmosfernogo vozdukha Moskovskogo regiona [Sources of Pollution and Atmospheric Air Quality in the Moscow Region], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, no. 2, pp. 109-116.

Shuvalova, Yu.O., Ginzburg, A.S. (2024) Kachestvo vozdukha v Moskve vo vremya karantina COVID-19 v sravnenii s drugimi regionami mira [Air Quality in Moscow during the COVID-19 Quarantine in Comparison with Other Regions of the World], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 70-81.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, no. 11, pp. 5380-5552.

Bronte-Moreno, O., Francisco-Javier, G.-B., Muñoz-Gall, X., Pueyo-Bastida, A., Ramos-González, J., Urrutia-Landa, I. (2023) Impact of air pollution on asthma: a scoping review, *Open Respiratory Archives*, vol. 5, no. 2, p. 100229.

Buoli, M., Grassi, S., Caldiroli, A., Carnevali, G.S., Mucci, F., Iodice, S., Cantone, L., Pergoli, L., Bollati, V. (2018) Is there a link between air pollution and mental disorders? *Environment international*, vol. 118, pp. 154-168.

Carabali, G., Villanueva-Macias, J., Ladino, L.A., Álvarez-Ospina, H., Raga, G.B., Andraca-Ayala, G., Miranda, J., Grutter, M., Silva, M.M., Riveros-Rosas, D. (2021) Characterization of aerosol particles during a high pollution episode over Mexico City, *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 22533.

Ceca, L.S.D., Micheletti, M.I., Piacentini, R.D. (2017) Atmospheric Particulate Matter Variability during 2014 at Buenos Aires City (Argentina) Comparing Ground-Based Measurements and Satellite Data, In *Proceedings*, vol. 1, no. 5, p. 180.

Chubarova, N.E., Vogel, H., Androsova, E.E., Kirsanov, A.A., Popovicheva, O.B., Vogel, B., Rivin, G.S. (2024) Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 22, pp. 10443-10466.

Contoni, D., Lin, Y.-H., Haenninen, O., Viana, M. (2021) Contribution of aerosol sources to health impacts, *Atmosphere*, vol. 12, no. 6, p. 740.

Daelemans, R., Verscheure, P., Rombouts, T., Keysers, S., Devriese, A., Peeters, G., Coorevits, L., Frans, G., Van Gerven, L., Bruffaerts, N., Honnay, O. (2025) The impact of ecosystem nitrogen enrichment on pollen allergy: a cross-sectional paired comparison study, *The Lancet Planetary Health*, vol. 9, no. 4, pp. e294-e303.

Genc, S., Zadeoglulari, Z., Fuss, S.H., Genc, K. (2012) The adverse effects of air pollution on the nervous system, *Journal of toxicology*, no. 1, p. 782462.

Ginzburg, A.S., Samoylovskaya, N.A. (2024) The “Nuclear winter” hypothesis and a responsible nuclear policy, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 94, no. 3, pp. 107-113.

Golitsyn, G.S., Grechko, E.I., Dzhola, A.V., Emilenko, A.S., Kopeikin, V.M., Rakitin, V.S., Safronov, A.N., Fokeeva, E.V., Wang, G., Wang, P. (2015) Studying the pollution of Moscow and Beijing atmospheres with carbon monoxide and aerosol, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 51, no. 1.

Gong, C., Xin, J., Wang, S., Wang, Y., Zhang, T. (2017) Anthropogenic aerosol optical and radiative properties in the typical urban/suburban regions in China, *Atmospheric Research*, vol. 197, pp. 177-187.

Gubanova, D.P., Ginzburg, A.S., Vinogradova, A.A., Chkhetiani, O.G., Semenov, V.A. (2025) The “dust haze” effect in the atmosphere of a megapolis, *Doklady Earth Sciences*, vol. 522, no. 1, pp. 1-8.

Guerreiro, C.B.B., Foltescu, V., De Leeuw, F. (2014) Air quality status and trends in Europe, *Atmospheric environment*, vol. 98, pp. 376-384.

Han, J.Y., Baik, J.J., Khain, A.P. (2012) A numerical study of urban aerosol impacts on clouds and precipitation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 69, no. 2, pp. 504-520.

Han, W., Li, Z., Wu, F., Zhang, Y., Guo, J., Su, T., Maureen, C., Chen, T., Wei, J., Lee, S.-S. (2020) Opposite effects of aerosols on daytime urban heat island intensity between summer and winter, *Atmospheric Chemistry and Physics. Discussions*.

IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 p.

---

---

IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.

Ji, D., Palm, M., Buschmann, M., Ebell, K., Maturilli, M., Sun, X., Notholt, J. (2025) Hygroscopic aerosols amplify longwave downward radiation in the Arctic, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 25, no. 7, pp. 3889-3904.

Kim, C.H., Jo, H.Y., Jo, Y.J., Lee, H.J., Kim, J.M., Lee, N.M., Jeong, S.Y., Baek, S.H., Park, M.J., Chang, L.S., Lee, J.J. (2023) Synoptic meteorological conditions and contributing factors to air quality during the SIJAQ campaign, *Atmospheric Environment*, vol. 309, p. 119939.

Kirsanov, A.A., Rozinkina, I., Rivin, G., Zakharchenko, D., Olchev, A. (2020) Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia, *Atmosphere*, vol. 11, no. 10, p. 1133.

Kopeikin, V.M., Ponomareva, T.Ya. (2021) Dependence of variations in black carbon content in the atmosphere of Moscow on air mass transport direction, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 34, no. 1, pp. 74-80.

Lanz, V.A., Prévôt, A.S.H., Alfarra, M.R., Weimer, S., Mohr, C., DeCarlo, P.F., Gianini, M.F.D., Hueglin, C., Schneider, J., Favez, O., d'Anna, B. (2010) Characterization of aerosol chemical composition with aerosol mass spectrometry in Central Europe: an overview, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 21, pp. 10453-10471.

Li, J., Carlson, B.E., Yung, Y.L., Lv, D., Hansen, J., Penner, J.E., Liao, H., Ramaswamy, V., Kahn, R.A., Zhang, P., Dubovik, O., Ding, A., Lacis, A.A., Zhang, L., Dong, Y. (2022) Scattering and absorbing aerosols in the climate system, *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 3, no. 6, pp. 363-379.

Liou, K.N. (2002) *An introduction to atmospheric radiation*, Second Edition, Academic Press, Orlando, International Geophysics Series, vol. 84, 583 p.

Luzhetskaya, A.P., Poddubny, V.A. (2020) Specific features of time variations in aerosol optical depth in the middle urals using multiyear observations in urban and background regions, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 33, no. 2, pp. 172-178.

Mandal, T.K., Gorai, A.K. (2014) Air quality indices: a literature review, *Journal of Environmental Science and Engineering*, vol. 56, no. 3, pp. 357-362.

Markowicz, K.M., Stachlewska, I.S., Zawadzka-Manko, O., Wang, D., Kumala, W., Chilinski, M.T., Makuch, P., Markuszewski, P., Rozwadowska, A.K., Petelski, T., Zielinski, T. (2021) A decade of Poland-AOD aerosol research network observations, *Atmosphere*, vol. 12, no. 12, p. 1583.

Marshall, L.R., Maters, E.C., Schmidt, A., Timmreck, C., Robock, A., Toohey, M. (2022) Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues, *Bulletin of Volcanology*, vol. 84, no. 5, pp. 54.

---

Middleton, P., Kiang, C.S., Mohnen, V.A. (1980) Theoretical estimates of the relative importance of various urban sulfate aerosol production mechanisms, *Atmospheric Environment*, vol. 14, pp. 463-472.

Montone, R.A., Rinaldi, R., Bonanni, A., Severino, A., Pedicino, D., Crea, F., Liuzzo, G. (2023) Impact of air pollution on ischemic heart disease: evidence, mechanisms, clinical perspectives, *Atherosclerosis*, vol. 366, pp. 22-31.

Myhre, G., Samset, B.H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Berntsen, T.K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T., Easter, R.C. (2013) Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 4, pp. 1853-1877.

Oberdoerster, G., Utell, M.J. (2002) Ultrafine particles in the urban air: to the respiratory tract – and beyond? *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, no. 8, pp. A440-A441.

Paulot, F., Paynter, D., Ginoux, P., Naik, V., Horowitz, L.W. (2018) Changes in the aerosol direct radiative forcing from 2001 to 2015: observational constraints and regional mechanisms, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, no. 17, pp. 13265-13281.

Peng, S., Zheng, Y., Li, L., Gui, K., Zhu, J., Liu, S., Zhang, H., Zhao, H., Che, H., Zhang, X. (2025) Long-term variations in aerosol optical properties in Beijing: insights from diurnal and nocturnal continuous measurements, *Atmospheric Environment*, vol. 360, p. 121416.

Petaejae, T., Tabakova, K., Manninen, A., Ezhova, E., O'Connor, E., Moisseev, D., Sinclair, V.A., Backman, J., Levula, J., Luoma, K., Virkkula, A. (2022) Influence of biogenic emissions from boreal forests on aerosol-cloud interactions, *Nature Geoscience*, vol. 15, no. 1, pp. 42-47.

Putaud, J.P. (2008) The COST633 aerosol phenomenology, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, *European Commission*, vol. 23534.

Putaud, J.P., Cavalli, F., Martin's dos Santos, S., Dell'Acqua, A. (2014) Long-term trends in aerosol optical characteristics in the Po Valley, Italy, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 17, pp. 9129-9136.

Savadkoobi, M., Pandolfi, M., Reche, C., Niemi, J.V., Mooibroek, D., Titos, G., Green, D.C., Tremper, A.H., Hueglin, C., Liakakou, E., Mihalopoulos, N. (2023) The variability of mass concentrations and source apportionment analysis of equivalent black carbon across urban Europe, *Environment international*, vol. 178, p. 108081.

Sharma, S., Chandra, M., Kota, S.H. (2020) Health effects associated with PM<sub>2.5</sub>: a systematic review, *Current pollution reports*, vol. 6, pp. 345-367.

Smith, C.J., Kramer, R.J., Myhre, G., Alterskjær, K., Collins, W., Sima, A., Boucher, O., Dufresne, J.L., Nabat, P., Michou, M., Yukimoto, S. (2020) Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 20, no. 16, pp. 9591-9618.

---

Sokhi, R.S., et al. (2021) A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions, *Environment International*, vol. 157, p. 106818, doi:10.1016/j.envint.2021.106818.

Stawoska, I., Myszkowska, D., Oliwa, J., Skoczowski, A., Weselucha-Birczyńska, A., Saja-Garbarz, D., Ziemianin, M. (2023) Air pollution in the places of *Betula pendula* growth and development changes the physicochemical properties and the main allergen content of its pollen, *Plos one*, vol. 18, no. 1, p. e0279826.

Sun, J., Liu, L., Xu, L., Wang, Y., Wu, Z., Hu, M., Shi, Z., Li, Y., Zhang, X., Chen, J., Li, W. (2018) Key role of nitrate in phase transitions of urban particles: implications of important reactive surfaces for secondary aerosol formation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 123, no. 2, pp. 1234-1243.

Tomasi, C., Lupi, A. (2017) Primary and secondary sources of atmospheric aerosol, *Atmospheric aerosols: Life cycles and effects on air quality and climate*, Wiley, pp. 1-86.

Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Boys, B.L. (2014) Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter, *Environmental health perspectives*, vol. 123, no. 2, p. 135.

Vinogradova, A.A., Gubanova, D.P., Lezina, E.A., Ivanova, Yu.A. (2024) Dust aerosol from the Northern Caspian Sea regions in near-surface air in the center of European Russia, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 37, no. 5, pp. 620-629.

Wang, C., Wang, C., Myint, S.W., Wang, Z.H. (2017) Landscape determinants of spatio-temporal patterns of aerosol optical depth in the two most polluted metropolitans in the United States, *Science of the Total Environment*, vol. 609, pp. 1556-1565.

WHO (2021) *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide?* World Health Organization, available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (accessed 25 December 2025).

Wu, H., Wang, T., Riemer, N., Chen, P., Li, M., Li, S. (2017) Urban heat island impacted by fine particles in Nanjing, China, *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 1422.

Wu, T., Boor, B.E. (2021) Urban aerosol size distributions: a global perspective, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21, no. 11, pp. 8883-8914.

Xu, J., Zhang, Q., Chen, M., Ge, X., Ren, J., Qin, D. (2014) Chemical composition, sources, and processes of urban aerosols during summertime in northwest China: insights from high-resolution aerosol mass spectrometry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 23, pp. 12593-12611.

Zhdanova, E.Y., Chubarova, N.Y., Lyapustin, A.I. (2020) Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product, *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 13, no. 2, pp. 877-891.

---

Zhdanova, E.Yu., Khlestova, Yu.O., Chubarova, N.E. (2019) Trends in atmospheric aerosol characteristics in Moscow derived from multiyear AERONET measurements, *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 32, pp. 534-539.

Zheng, C., Zhao, C., Zhu, Y., Wang, Y., Shi, X., Wu, X., Chen, T., Wu, F., Qiu, Y. (2017) Analysis of influential factors for the relationship between PM<sub>2.5</sub> and AOD in Beijing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 17, pp. 13473-13489.

*Статья поступила в редакцию (Received): 08.02.2026.*

*Статья доработана после рецензирования (Revised): 12.03.2026.*

*Принята к публикации (Accepted): 21.03.2026.*

### **Для цитирования / For citation**

Гинзбург, А.С., Шувалова, Ю.О., Докукин, С.А., Тихоненко, Н.Д. (2026) Воздействие городского аэрозоля на климатические процессы и качество воздуха, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 2, с. 177-200, doi:10.21513/2410-8758-2026-2-177-200.

Ginzburg, A.S., Shuvalova, Yu.O., Dokukin, S.A., Tikhonenko, N.D. (2026) The impact of urban aerosol on climate processes and air quality, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 2, pp. 177-200, doi:0.21513/2410-8758-2026-2-177-200.