ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2025, том 61, № 2, с. 207–237

УДК 551.51

АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 1. ИСТОЧНИКИ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, КОЛИЧЕСТВО ПРИРОДНЫХ ПЕРВИЧНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

© 2025 г. С. А. Рябова

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Ленинский проспект, 38, стр. 1, Москва, 119334 Россия

e-mail: riabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 29.08.2024 г.
После доработки 24.09.2024 г.
Принята к публикации 15.11.2024 г.

В настоящей работе выполнен обзор природных источников аэрозолей, не связанных с прямой или косвенной деятельностью человека, которые вносят значительный вклад в общие выбросы аэрозольных частиц. При выполнении настоящих исследований рассматривались характеристики образования и транспортировки аэрозолей, а также их химического состав. Показано, что первичные природные аэрозоли образуются из широкого круга источников, доля каждого из которых зависит от местоположения, времени года и времени суток. В ходе анализа литературных данных систематизировались данные о химическом составе и величине ежегодной эмиссии аэрозольных частиц природного происхождения. Результаты исследований показали, что природные аэрозольные частицы характеризуются широкой вариабельностью химического состава. В настоящей работе показано, что современные оценки глобальных выбросов природных аэрозолей (с использованием измерений, современных химических транспортных моделей, глобальных климатических моделей и различных схем параметризации) отличаются на порядки. Представлены данные о влиянии на состояние здоровья населения разных групп аэрозольных частиц (минеральная пыль, аэрозоли морской соли, аэрозоли от вулканической активности и аэрозольное загрязнение при природных пожарах). Показано, что воздействие аэрозольного загрязнения может приводить к негативным последствиям для здоровья человека, в том числе к сердечно-сосудистым заболеваниям, цереброваскулярным заболеваниям, острым заболеваниям нижних дыхательных путей, раку легких, неблагоприятным исходам родов и неонатальным заболеваниям, и даже к смерти, однако аэрозоли от морской соли могут оказывать и положительное влияние на здоровье человека (положительная биологическая активность некоторых фикотоксинов, в частности, ессотоксина).

Ключевые слова: природные аэрозоли, минеральная пыль, аэрозоли морской соли, пожары, космическая пыль, извержение вулкана, глобальный годовой поток, здоровье человека

DOI: 10.31857/S0002351525020066, **EDN:** GJYKKA

1. ВВЕДЕНИЕ

Аэрозоли — это аэродисперсные (коллоидные) системы, в которых неопределенно долгое время могут находиться во взвешенном состоянии твердые частицы (пыль), капельки жидкости, образующиеся либо при конденсации паров, либо при взаимодействии газовых сред, либо попадающие в воздушную среду без изменения фазового состава [Förstner, 1998]. Значительная часть аэрозолей формируется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц между собой или с водяным паром [Andreae and Gelencsér, 2006; Zhuravleva et al., 2016; Yashnik and Ismagilov, 2016].

Аэрозольные частицы характеризуются широкой вариабельностью структуры и формы. Частицы чаще всего классифицируют на основе их

аэродинамического диаметра. Размер аэрозольных частиц может варьировать от менее чем 0.01 до 1000 мкм, и чаще всего он меньше 50 мкм [Pope and Dockery, 2006]. Что касается распределения аэрозольных частиц, в нижних слоях атмосферы выделяют следующие основные фракции [Аэрозоль, 1991]: $PM_{10\text{-}2.5}$, также известные как частицы крупной фракции (обычно определяемые как частицы с аэродинамическим диаметром более 2.5 мкм, но не больше 10 мкм); $PM_{2.5}$, также известные как частицы мелкой фракции (частицы с аэродинамическим диаметром 2.5 мкм или меньше); $PM_{0.1}$, также известные как частицы ультрамелкой фракции (частицы размером менее 0.1 мкм); $PM_{0.05}$, также известные как наночастицы (частицы диаметром меньше или равным 0.05 мкм). Из всех фракций аэрозольных частиц в атмосфере наиболее распространены PM0.1, а наибольшей массой характеризуются частицы PM_{10} [Grantz et al., 2003; Mannucci et al., 2015].

Что касается источников происхождения, аэрозольные частицы могут быть непосредственно выброшены из антропогенных (техногенных) или природных источников (так называемые первичные аэрозоли) или образовываться в атмосфере из ряда газообразных побочных продуктов сгорания, таких как летучие органические соединения (ЛОС), аммиак (NH_3), оксиды серы (SO_x) и оксиды азота (NO_x) (так называемые вторичные аэрозоли) [Krupa, 1997].

Присутствие аэрозолей в атмосфере играет чрезвычайно важную роль в формировании климата Земли. В целом, можно выделить три основных пути влияния атмосферного аэрозоля на климат: прямое влияние аэрозолей на радиационный баланс системы «земная поверхность-атмосфера» посредством перераспределения коротковолнового солнечного и теплового излучений в этой системе за счет рассеяния и поглощения на аэрозольных частицах, неравномерно распределенных в земной атмосфере [Ångström, 1962; McCormic and Ludwig, 1967; Schulz et al., 2006]; косвенное влияние — влияние аэрозольных частиц на фазовые переходы воды в атмосфере, в частности при облако- и осадкообразовании, что имеет для энергетики системы «земная поверхность-атмосфера» еще более важное значение, чем первый фактор [Twomey, 1974, 1977; Albrecht, 1989; Lohmann and Feichter, 2005]; и полупрямое влияние — влияние аэрозольного воздействия на свойства и численность облаков за счет модификации тепловой структуры атмосферы и баланса приземной энергии [Hansen et al., 1997; Ackerman et al., 2000; Ramanathan et al., 2001; Johnson et al., 2004; Johnson, 2005].

Длительное воздействие аэрозольного загрязнения (главным образом $PM_{2.5}$) может приводить к негативным последствиям для здоровья человека, в том числе к сердечно-сосудистым заболеваниям, цереброваскулярным заболеваниям, острым заболеваниям нижних дыхательных путей, раку легких, неблагоприятным исходам родов и неонатальным заболеваниям, и даже к смерти [Lelieveld et al., 2015; Cohen et al., 2017; Schraufnagel et al., 2019; Murray et al., 2020]. Кроме того, воздействие $PM_{2.5}$ может приводить к сокращению продолжительности жизни на срок, который может составлять в среднем в мире 1.4 года [Apte et al., 2015], а в Китае — 3 года [Chen et al., 2013]. По известным статистическим результатам [Seposo et al., 2018] 4.2 млн смертей были связаны с воздействием $PM_{2.5}$, что позиционирует его как пятый фактор риска смертности.

Первичные аэрозоли образуются из широкого круга источников (как естественных, так и антропогенных), доля каждого из которых зависит от местоположения, времени года и времени суток. Природные источники, не связанные с прямой или косвенной деятельностью человека, могут вносить значительный вклад в общие выбросы аэрозолей. Источниками аэрозольного загрязнения, включенными в эту категорию, являются: минеральная пыль, аэрозоли морской соли, аэрозоли от вулканической активности, космическая пыль и аэрозольное загрязнение при природных пожарах [Stohl et al., 2011; Liora et al., 2015].

В настоящей работе предпринята попытка систематизации многочисленных результатов исследования естественного аэрозольного загрязнения. Выполняется анализ современных литературных данных по природным источникам происхождения аэрозольного загрязнения в атмосфере, химическим свойствам выделяемых микродисперсных частиц и оценке ежегодной эмиссии, а также воздействию естественного аэрозольного загрязнения на здоровье человека.

2. МИНЕРАЛЬНАЯ ПЫЛЬ

Минеральная пыль, являющаяся основным компонентом тропосферных аэрозолей, по оцен-

кам, составляет около половины от общего количества тропосферных аэрозолей с годовым количеством 1000–5000 Мт/год [Werner et al., 2002; Miller et al., 2004; Zender et al., 2004; Tanaka et al., 2006; Xiong et al., 2020]. Оценка среднего глобального уровня выбросов минеральной пыли с помощью модели AeroCom [Huneeus et al., 2011] составила $1.6 \cdot 10^3$ Мт/год (диапазон стандартной ошибки: $1.0–3.2 \cdot 10^3$ Мт/год), с помощью модели CMIP5 [Wu et al., 2020] — $2.7\ (1.7–3.7) \cdot 10^3$ Мт/год. По данным публикации [Kok et al., 2021a] глобальный уровень выбросов пыли PM_{20} составляет $4.6\ (3.4–9.1) \cdot 10^3$ Мт/год, причем на сверхкрупную пыль приходится ~ 65 % [Huang et al., 2021] от общего потока выбросов пыли PM_{20}, что соответствует $2.9\ (1.8–6.5) \cdot 10^3$ Мт/год. Величина выброса пылевых аэрозолей естественного происхождения различается в зависимости от размера частиц и составляет в среднем: 1654 Мт/год [Luo et al., 2003] или 1490 Мт/год [IPCC, 2001] для частиц минеральной пыли размерами 0.1–10 мкм (варьирует от 981 и 4313 Мт/год [Huneeus et al., 2011]); мощность выброса фракции 6 мкм варьирует от 1604 до 1960 Мт/год [Ginoux et al., 2001, 2012]. Без учета вклада деятельности человека современные выбросы пылевых аэрозолей, происходящие из природных источников, составляют 1840 Мт/год [Tegen et al., 2004].

Территориально основными источниками минеральной пыли являются засушливые регионы Северной Африки, Аравийского полуострова [Cheng et al., 2005a; Zhang et al., 2008; Wang et al., 2005], Центральной Азии [Sun et al., 2000] и Китая [Zhang, 1997; Chen et al., 2017]. Сахара, расположенная в Северной Африке, представляет собой крупную субтропическую пустыню, охватывающую Западную Сахару, Марокко, большую часть Алжира, Мавритании, Мали, Нигера, Ливии, Чада, Египта, Судана и Туниса, и является наиболее плодовитым пылевым источником в мире [Prospero and Lamb, 2003; Washington et al., 2003]. Оценки мощности источников в Сахаре варьируются от 130 до 1600 Мт/год (более 50% глобальных выбросов пыли) [Goudie and Middleton, 2001; Ozer, 2001; Engelstaedter et al., 2006; Wang et al., 2016; Kok et al., 2021b]. К локальным источникам минеральной пыли следует отнести пересохшие русла рек и озер. Северное полушарие характеризуется существенно более высокой пылевой нагрузкой по сравнению с южным, что связывают с более обширными пустынями в северном полушарии, простирающимися через так называемый «пылевой пояс» [Prospero et al., 2002; Ginoux et al., 2012; Choobari et al., 2014], в отличие от более мелких источников в Австралии, Южной Африке и Южной Америке. Пыль также образуется в холодных условиях высоких широт, в таких как на Аляске, в Канаде, Евразии, Гренландии и Исландии в Северном полушарии, и в южном полушарии в Антарктиде. На долю этих источников приходится около 5% глобальных выбросов пыли [Bullard et al., 2016].

Около 40% аэрозолей в тропосфере составляют частицы пыли от ветровой эрозии [Tegen and Fung, 1995]. Под воздействием ветров минеральные частицы могут переноситься на достаточно большие расстояния, например, минеральная пыль, поступающая в воздух из бассейнов Кайдам, Тарим и плато Ала-Шань, переносится на обширные территории Азии и через Тихий океан в Северную Америку [Jaffe et al., 1999; Husar et al., 2001; Sassen, 2002]. Пыль из пустыни Сахара и региона Сахель в Северной Африке эффективно переносится в сторону Атлантического океана, достигая как Северной и Южной Америки [Prospero, 1999; Reid et al., 2003; Prospero et al., 2014], так и западной и восточной сторон Средиземноморского бассейна, включая континентальную Европу [Meloni et al., 2008; Di Mauro et al., 2019]. Из источников Ближнего Востока пыль эффективно транспортируется в сторону Аравийского, Красного и Средиземного морей, а также в Индию [Kalenderski and Stenchikov, 2016; Banks et al., 2017]. Азиатская пыль из пустынь Гоби и Такла-Макан наблюдалась на расстоянии до 5000 км от источников на западном побережье Тихого океана и даже совершала круговой перенос по всему земному шару [Uno et al., 2009]. Пыль из Северной Африки и Азии также обнаружена в кернах арктического льда [Han et al., 2018]. Выбросы из источников в Южной Африке и Южной Америке зафиксированы в отложениях Антарктики [Biscaye et al., 1997; Petit et al., 1999].

Хорошо изучен химический состав минеральной составляющей атмосферных аэрозолей над континентами (массовые %): SiO_2 – 40–50%; Al_2O_3 – 15%; Fe – 5.4–6.0 %; CaO – 2.4–0.9 %; Na_2O – 2–1.5 %; K_2O – 1.9–1.1 %; MgO – 1.5–1.2 %; TiO – 1.0– 0.2%; MnO – 0.08–0.05 % [Романовская и Савин, 2021]. Кроме этих компонентов наблюдается относительно большое содержание Cu, Ba, Ni, Sc, Cr, Zn [Ивлев и Довгалюк, 1999].

Материал земной коры включает в себя частицы почвы, образующиеся в результате процессов ветровой эрозии (включая вклад пустынной пыли), ресуспензии в результате движения, обработки, транспортировки и хранения материалов и работ на землях сельскохозяйственного назначения. Химический состав пыли не идентичен полностью химическому составу почв ввиду того, что не все минералы и другие почвенные продукты одинаково диспергируются. Основные компоненты, связанные с коровым материалом: алюминий (Al), кремний (Si), кальций (Ca) и железо (Fe) обычно ассоциируются с крупной фракцией ($PM_{2.5-10}$) [Viana et al., 2008].

Пыльные бури снижают суточные концентрации NO_3, N_2O_5 и HNO_3 до 60 %, а OH, HO_2 и H_2O_2 на 25–98% [Zhang et al., 1994; Zhang and Carmichael, 1999]. Снижение концентрации этих прекурсоров приводит к снижению концентрации O_3 до 30% [Umann et al., 2005]. Сульфаты и нитраты абсорбируются и/или образуются на поверхности смоченных частиц пыли и вытесняют карбонаты во время процессов переноса на большие расстояния [Elperin et al., 2019]. Результаты анализа осадков, отобранных во время азиатских пылевых бурь в Корее и Японии, говорят в пользу этой гипотезы и показывают, что до 75% карбонатов вытесняется нитратами и сульфатами к тому времени, когда частицы достигают Кореи и Японии [Ro et al., 2005; Jeong, 2020; Ko et al., 2020]. Данные [Nishikawa et al., 1991] показывают, что 70%, или более, SO_4^{2-} и NO_3 образуются на поверхности минеральной пыли.

Из-за своей внезапности, кратковременности и высокой интенсивности пылевые бури часто наносят серьезный ущерб за короткое время. Пылевые бури приносят в атмосферу колоссальное количество аэрозолей, которые могут значительно ухудшить качество воздуха и фотосинтетическую активность [Korotaeva et al., 2018; Kaskaoutis et al., 2019] за счет увеличения концентрации аэрозольных частиц до уровней, которые потенциально повышают атмосферную мутность, вызывая существенное снижение солнечной и атмосферной радиации через рассеяние и поглощение [Kaskaoutis et al., 2006, 2019; Garcia–Pando et al., 2014; Maghrabi and Al-Dosari, 2016]. Кроме того, ветровая эрозия, вызванная пыльными бурями, усугубляет опустынивание, серьезно влияя на экосистему и здоровье человека [Kang et al., 2017]. В целом, пыль оказывает неблагоприятное воздействие на здоровье человека и изменение климата в региональном и даже глобальном масштабах [Huang et al., 2014; Zhao et al., 2018; Liu et al., 2021]. Так пыль из пустынь может представлять серьезную опасность для окружающей среды и человека, учитывая ее негативное влияние на качество воздуха не только вблизи, но и за тысячи километров от пустынь или других источников выбросов пыли [Prospero et al., 2002; Ginoux et al., 2012]. В зависимости от погоды и климата пыль пустыни может оставаться взвешенной в атмосфере в течение нескольких дней, вызывая вспышки аллергии вдали от своего источника [Mori et al., 2003; Rodríguez et al., 2011].

Физические, биологические и химические свойства частиц пыли потенциально могут оказывать пагубное воздействие на здоровье человека [Mori et al., 2003; Zhang et al., 2016]. Пыль может распространять инфекционные заболевания, такие как менингококковый менингит и лихорадка Рифт–Вэлли [Griffin et al., 2001; Ho et al., 2005; Agier et al., 2013; Lewis et al., 2015]. Данные также свидетельствуют о том, что частое воздействие пылевых бурь может привести к усилению неблагоприятных последствий для здоровья [Mu et al., 2011; Goudie, 2014; Altindag et al., 2017; Tong et al., 2017; Li et al., 2018; Viel et al., 2019] у людей почти всех возрастных групп и полов [Chen et al., 2004; Chan et al., 2011; Crooks et al., 2016]. Люди с диабетом, гипертонией, цереброваскулярными заболеваниями, или легочными заболеваниями подвергаются более высокому риску [Kashima et al., 2017].

В редких случаях пылевое загрязнение может привести к смерти [Panikkath et al., 2013; Zhang et al., 2016]. В частности, увеличение количества аэрозольных частиц во время пылевых бурь вызвало значительное увеличение уровня смертности в Барселоне [Giannadaki et al., 2014]. Повышенные уровни PM10 во время пыльных бурь в Азии увеличили смертность от сердечно-сосудистых заболеваний [Chen and Yang, 2005; Perez et al., 2008; Kashima et al., 2012; Delangizan and Jafari, 2013]. По данным, полученным на Ближнем Востоке, пыльные бури могут вызывать процессы воспаления и коагуляции крови даже у молодых людей [Jaafari et al., 2020, 2021], оказывать неблагоприятное воздействие на функцию легких [Ghozikali et al., 2018] и увеличивать число больных астмой [Thalib and Al-Taiar, 2012; Trianti et al., 2017]. И наоборот, исследования,

проведенные в Италии [Sajani et al., 2011], Греции [Samoli et al., 2011], Кувейте [Al-Taiar and Thalib, 2014] и Тайбэе [Lee et al., 2014] либо исключили вероятность увеличения смертности или госпитализации пациентов из-за воздействия пыльных бурь, либо не нашли это увеличение значительным. Пыльные бури не привели к существенному увеличению госпитализации пациентов с астмой или приступов астмы в Тайбэе и Японии [Min et al., 2001; Bell et al., 2008; Ueda et al., 2010].

3. АЭРОЗОЛИ МОРСКОЙ СОЛИ

Аэрозоли морской соли, частицы которых имеют диаметр менее 10 мкм, являются преобладающими аэрозолями в приземном морском воздухе и могут вносить значительный вклад в аэрозольное загрязнение на суше, особенно при высоких скоростях приземного ветра [Satheesh and Moorthy 2005; Holmes, 2007]. Морской аэрозоль образуется на морской поверхности и может подниматься в верхние слои тропосферы [Seinfeld and Pandis, 2006]. Исследования [Liao et al., 2006] показали, что морской аэрозоль доминирует в массе аэрозоля в морском пограничном слое.

Основным механизмом образования аэрозоля морской соли является ветровая генерация, в частности, пузырьковый механизм образования морских брызг (морские брызги представляют собой комбинацию неорганической морской соли и органических веществ) [O'Dowd and de Leeuw, 2007; Grythe et al., 2014]. Кроме скорости ветра [Andreas, 1998; Lewis and Schwartz, 2004; Klingebiel et al., 2019] на процесс образования капель влияет температура водной поверхности, изменяя физические свойства поверхностной воды [Keene et al., 2017; Salter et al, 2014]. Генерация морского аэрозоля на поверхности моря также зависит от солености морской воды, стабильности атмосферы, высоты и крутизны волн [Monahan et al., 1986; O'Dowd and Smith, 1993; Gong et al., 1997; Gong, 2003; Mårtensson et al., 2003; Witek et al., 2007; Jaeglé et al., 2011].

Повышенное внимание в последние годы уделяется исследованиям морского аэрозоля в Арктической зоне, отличающейся большой динамикой природной среды и уязвимостью к изменениям климата. Исследования аэрозоля в Российском секторе Арктики активизировались в последние 10–15 лет: организованы наблюдения на полярных станциях («Тикси», «Баренцбург», «Мыс Баранова») [Кабанов и др., 2023, 2024], регулярно проводятся морские [Шевченко и др., 2019; Sakerin et al., 2020; Сакерин и др., 2021; Полькин и др., 2022] и самолетные [Антохина и др., 2017, 2024; Сакерин и др., 2022] экспедиции.

Глобальные выбросы веществ морского происхождения по современным оценкам (с использованием измерений, современных химических транспортных моделей, глобальных климатических моделей и различных схем параметризации) отличаются на порядки и лежат в диапазоне от $0.01 \cdot 10^5$ до $24 \cdot 10^5$ Мт/год (что составляет около 30–75% от общего производства аэрозоля из природных источников) [Gong et al. 2002; Clarke et al., 2006; Norris et al., 2008; Schulz et al., 2009; Sofiev et al., 2011; Grythe et al., 2014; Trueblood et al., 2019]. В частности, по измерениям, общий годовой поток морской соли (основного компонента морских брызг) оценивается примерно в 5000 тонн в год [Lewis and Schwartz, 2004]; Межправительственная группа экспертов по изменению климата [IPCC, 2001] дала оценку 3340 Мт/год. Потоки морской соли в модельных оценках также сильно различаются от 1800 до 22000 Мт/год [Dentener et al., 2006; Textor et al., 2006; Vignati et al., 2006; Jaegle et al., 2011]. Причина такой большой неопределенности может быть объяснена несколькими факторами, включая неопределенность из-за механизмов источника, неопределенность из-за неоднородности различных регионов источников, которые нелегко учитывать с помощью текущих глобальных моделей с крупной сеткой, а также неопределенности в модельных расчетах и параметризации [de Leeuw et al., 2011]. Оценки глобальных выбросов первичной морской органической массы на основе моделей охватывают диапазон 6.9–76 Мт/год для выбросов < 1 мкм и 7.5–58 Тг/год для выбросов > 1 мкм [Gantt et al., 2011; Ito and Kawamiya, 2010; Myriokefalitakis et al., 2010; Long et al., 2011; Spracklen et al., 2008; Westervelt et al., 2012; Tsigaridis et al., 2013; Russell et al., 2023].

Морские аэрозоли состоят как из первичных, так и из вторичных неорганических и органических компонентов [Miyazaki et al., 2010]. В удаленной морской атмосфере ионы морской соли вносят значительный вклад в массу аэрозоля Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}, Mg^{2+}, K^+ и Ca^{2+} [Wang et al., 2013; Zhang et al., 2010; Xiao et al., 2017]. Химический

состав частиц морского аэрозоля примерно соответствует химическому составу сухого остатка морской воды: NaCl – 78%, $MgCl_2$ – 11%, $CaSO_4$, Na_2SO_4, K_2SO_4 – 11%, а также включает ряд органических соединений [Трифонов и Девисилов, 2007; Ивлев и Довгалюк, 1999]. Как природные, так и антропогенные компоненты из континентальных источников также могут влиять на концентрации NO_3^- , SO_4^{2-}, Ca^{2+}, K^+ и следовые концентрации металлов над открытым океаном [Wen et al., 2006; Duce et al., 2008; Wang et al., 2013; Hsu et al., 2014]. Накопление и перенос токсичных веществ на границе океан-атмосфера могут привести к значительному загрязнению приводного слоя атмосферы [Kolesnikov et al., 2005; Qureshi et. al., 2009; Song et al. 2019]. Исследования тяжелых металлов в морских аэрозолях проводятся группами ученых в различных районах мира [Goncharuk et al., 2012], в частности, в Северном море [Salomons et al. 1988; Kersten et al., 1994] и Азовском море [Chichaeva et al., 2020], в арктических морях [Shevchenko et al., 2003; Golubeva et al., 2011; Ji et al., 2019], в Атлантическом и Индийском океанах [Völkening and Heumann, 1990; Rädlein et al. 1992; Witt et al. 2006], в антарктических морях [Tuohy et al., 2015]. Химически активный азот из антропогенных источников составляет треть внешних запасов азота в океане [Duce et al., 2008]. Предполагается, что 80–100% осаждения азота в открытый океан происходит из антропогенных источников [Kim et al., 2014]. Кроме того, поступление в океан оксидов серы и азота из антропогенных или природных источников в атмосферу может ускорить темпы подкисления океана [Doney et al., 2007]. Другие атмосферные вещества, такие как железо, фосфор, кадмий и стойкие органические загрязнители, также могут оказывать влияние на океан. Однако исследования показывают, что воздействие антропогенных веществ на океаны может быть не таким значительным, как ожидалось ранее [Jickells et al., 2003; Altieri et al., 2014, 2016].

Океаны и моря содержат множество биогенных или природных молекул, которые попадают в воздух в результате аэрозолирования морских брызг [Leck and Bigg, 2005a,b]. Помимо бактерий, которые являются известными производителями биогенных веществ, многие виды фитопланктона также производят широкий спектр биоактивных молекул, таких как пигменты, полифенолы и фикотоксины [Van Dolah, 2000; de Morais et al., 2015]. Фикотоксины представляют собой группу веществ, продуцируемых некоторыми видами водорослей, микроводорослей и цианобактерий. Некоторые морские микроорганизмы и водоросли выделяют различные экзотоксины, которые могут повреждать различные ткани млекопитающих, в том числе человека [Alexander and Rietschel, 2001; Gentien and Arzul, 1990], причем экзотоксины могут распыляться и переноситься ветрами к побережью [Pierce, 1986]. Другие токсичные соединения, такие как эндотоксины (липополисахариды грамотрицательных бактерий (ЛПС)) представляют собой структурные компоненты определенных бактерий и высвобождаются только при лизисе (распаде) бактериальной клетки [Galanos and Freudenberg, 1993]. ЛПС обладают весьма широким спектром биологической активности. Попадая в организм, эндотоксин может действовать на различные клетки и вызывать целый ряд эффектов [Лиходед и Бондаренко, 2009; Matsuhashi and Yoshioka, 2002; Stoll et al., 2004]. Исход взаимодействия с различными клетками зависит от концентрации ЛПС [Яковлев, 2003]. При попадании в кровоток физиологических доз ЛПС имеет место так называемая физиологическая системная эндотоксинемия [Яковлев, 2021], которая при увеличении концентрации эндотоксина в кровотоке проявляет агрессивные свойства, характеризующиеся очень широким спектром патогенного действия. С увеличением дозы эндотоксин вызывает гипераактивацию клеток и систем, что может приводить к развитию диссеминированного внутрисосудистого свертывания, эндотоксинового шока и полиорганной недостаточности [Galanos and Freudenberg, 1993; Ngkelo et al., 2012; Sweet and Hume, 1996]. Цианобактерии, которые распространяются во время цветения в пресной [Oliver and Ganf, 2002] и морской воде [Paerl, 2002], также могут быть важным морским источником эндотоксина.

В целом вредное воздействие аэрозолированных фикотоксинов является довольно редким явлением, поскольку требуется сочетания благоприятных погодных условий для выработки морских аэрозольных частиц и токсинообразующего «цветения». Значительные концентрации фикотоксинов (бревetоксинов [Cheng et al., 2005c] и оватоксинов [Ciminiello et al., 2014]) были зарегистрированы в период «цветения» водорослей в Мексиканском заливе и Средиземном море.

Вдыхание морского аэрозоля, содержащего бреветоксины, вызывает проблемы с дыханием, включая непроизвольный кашель и чихание, слезотечение, ринорею, ощущение жжения в горле и носу [Backer et al., 2003; Cheng et al. 2005b; Pierce et al., 2003; Spaulding, 2009; Brovedani et al., 2016]. В целом концентрации аэрозолированных фикотоксинов в воздухе, как правило, низкие. Предполагается, что эти фоновые концентрации могут оказывать положительное, а не отрицательное воздействие на здоровье человека. В частности, наблюдается положительная биологическая активность некоторых фикотоксинов, например, ессотоксина, что указывает на их потенциальное терапевтическое применение [Alfonso et al., 2016; Riquelme et al., 2018; Pradhan and Ki, 2022].

4. АЭРОЗОЛИ ОТ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

Первичные аэрозольные частицы, выбрасываемые вулканическими извержениями, образуются в результате фрагментации магмы и эрозии жерловых стенок. Первичная пыль от непрерывной эруптивной активности вулканов составляет в среднем только 1% или меньше от выбросов почвенной пыли [Andreae, 1995]. Первичные сульфатные аэрозоли (например, SO_4^{2-} и H_2S) выбрасываются непосредственно из жерла [Allen et al., 2002; Mather et al., 2003, 2004; Zelenski et al., 2015]. Количество первичных сульфатных аэрозолей обычно составляет менее 1% [Stoiber et al., 1987], но в некоторых случаях может быть значительно больше, порядка 10 или даже 20% [Graf et al., 1998].

Ежегодно во всем мире происходит 50–100 извержений вулканов, активность которых может длиться от нескольких часов до нескольких лет, при этом в любую определенную дату извергается около 20 вулканов [Loughlin et al., 2015]. Извержения вулканов с индексом вулканической эксплозивности (VEI[1]) меньше 4 наиболее многочисленны. Выброс вулканического пепла в тропосферу в результате таких небольших извержений оценивается в 20–100 Мт/год [Береснев и Грязин, 2008; Mather, 2003; Kokhanovsky, 2008]. Однако эти выбросы вулканического пепла обычно быстро удаляются из атмосферы и поэтому представляют местный интерес, т.е. только в непосредственной близости от вулканов, на расстоянии около ста километров. Наиболее мощные извержения вулканов сильно загрязняют верхние слои атмосферы, но для нижних слоев вулканы как загрязнители имеют лишь локальное значение [Ивлев, 1982; Трифонов и Девисилов, 2007].

Количество вулканических частиц, инжектирующихся в ходе взрывных извержений, пропорционально силе извержения [Self, 2006; Deligne et al., 2010]. В частности, глобальный годовой поток мелкодисперсного пепла (частицы < 63 мкм) в атмосферу оценивается примерно в 176–256 Мт. Из этого общего количества тропосферная пыль составляет примерно 200 Мт/год [Mather et al., 2003]. Помимо прямых выбросов повторное взвешивание и рассеивание свежеотложенного мелкодисперсного вулканического пепла ветром также оказывает большое влияние на уровень PM_{10} [Thorsteinsson et al., 2012].

Небольшое количество сернокислотных аэрозолей (4–20 Мт/год) при извержениях вулканов оказывается заброшенным в стратосферу, где они на высотах от 13 до 25 км над поверхностью земли участвуют в формировании слоя скопления аэрозольных частиц (слой Юнге) [Halmer et al. 2002; Дивинский и Ивлев, 2012; Andersson et al., 2015]. Существующие в стратосфере озон, свободные атомы кислорода и гидрокисльные радикалы OH– через промежуточные продукты (SO_3, HSO_3) превращают сернистый газ в серную кислоту [Угольников, 2018].

Воздействие вулканических газов и аэрозолей указано в качестве причины 1% от общего числа смертельных исходов от вулканической опасности (2283 человека) [Brown et al., 2017]. Эта оценка включает только смертельные случаи в результате экстремального прямого воздействия и не включает преждевременную смертность, вызванную долгосрочным загрязнением воздуха и окружающей среды.

По оценкам, более миллиарда человек живут в радиусе 100 км от действующих вулканов [Freire et al., 2019], в пределах этого радиуса жители подвергаются воздействию вулканического загрязнения воздуха [Tam et al., 2016; Crawford et al., 2021]. Физические и химические свойства пепла могут значительно различаться в зависимости от извержений и расстояния от вулкана [Jenkins et al., 2015]. Вулканические аэрозольные частицы представляют собой гетерогенную смесь пепловых частиц и кислых сульфатсодержащих

[1] Относительная мера взрывоопасности извержения вулкана [Newhall and Self, 1982].

и металлосодержащих аэрозольных частиц [Oppenheime et al., 2003]. Сернистые газы (в частности, SO_2), сульфатный аэрозоль и пепел поступают в организм человека воздушно-капельным путем и могут вызвать долгосрочные последствия, причем как локально, так и за сотни-тысячи километров от источника во время крупных трещинных или взрывных извержений [Schmidt et al. 2011, 2015; de Lima et al. 2012; Durant et al. 2012; Eychenne et al. 2015; Ilyinskaya et al. 2017]. Вдыхание пепла может усугубить респираторные симптомы, такие как кашель и одышка, а также симптомы астмы и бронхита [Baxter et al., 1983; Covey et al., 2019;]. Извержение вулкана Таджогайте, начавшееся на острове Ла Пальма 19 сентября 2021 года, привело к раздражению глаз и респираторным симптомам, расстройствам настроения и бессоннице среди населения [Rodríguez–Pérez et al., 2024]. Наряду с основными газами (например, H_2O, SO_2, CO_2 и т. д.) и пеплом [Oppenheime et al., 2003] вулканы выделяют летучие следы металлов и металлоидов (например, Cu, Zn, As, Pb, Se) [Dœlsch et al., 2006; Moune et al., 2010; Mather et al., 2012; Zelenski, et al., 2013; Gauthier et al., 2016; Mason et al., 2021]. Интенсивность выбросов металлических загрязнителей в периоды интенсивной дегазации может быть сопоставима с суммарными антропогенными потоками из густонаселенных промышленно развитых стран [Ilyinskaya et al., 2021].

5. АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛИ ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Количество аэрозольных частиц внеземного происхождения в атмосфере Земли сравнительно невелико. Ежегодно порядка 100–200 млн метеоритов достигают атмосферы Земли. Значительная масса космической пыли осаждается в атмосфере в результате замедления метеоритов, распыления и абляции на высоте от 80 до 120 км. Метеоритный мусор транспортируется как вниз, под действием силы тяжести, адвекции, вихревого перемешивания и других волновых эффектов, так и к полюсам с помощью меридиональной системы циркуляции. [Plane, 2003]. Аблированные атомы и метеоритные аэрозольные частицы, которые в итоге формируются в ходе химических реакций и конденсации из газовой фазы, участвуют в различных атмосферных химических процессах [Plane, 2003], играют важную роль в формировании мезосферы и стратосферных облаков [Turco et al., 1981].

Доля пылевых частиц космического происхождения составляет приблизительно 10% от общего содержания аэрозольных частиц в нижней стратосфере и с высотой увеличивается до 80–100% [Kokhanovsky, 2008; Plane, 2012]. В целом на поверхность Земли в год выпадает $4 \cdot 10^{-2}$ — $2 \cdot 10^{4}$ Мт космического вещества со средним значением $2 \cdot 10^{-2}$ Мт/год [Zook, 2001; Gardner, 2014].

6. АЭРОЗОЛИ ОТ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

Природные пожары, возникающие в результате возгорания лесов, кустарников, лугов и другой растительности, являются широко распространенным и критически важным элементом земной системы [Bond and Keeley, 2005] и постоянной глобальной особенностью, которая возникает практически каждый месяц года. По оценкам, на земном шаре ежегодно возникает до 400 тыс. природных пожаров. Ежегодная площадь выгораний в мире оценивается примерно в 420 млн га [Giglio et al., 2018], что по площади превышает территорию Индии. В период 1998–2015 гг. общая площадь выгоревших природных территорий в мире сократилась почти на четверть ($-24.3 \pm 8.8\%$, или $-1.35 \pm 0.49\%$ в год). Значительное сокращение пожаров произошло в тропических саваннах Южной Америки и Африки и луговых степях Азии [Andela et al., 2018]. В настоящее время в общем количестве лесных пожаров на планете доминируют пожары, происходящие на территории Северной Евразии [Бондур и Гинзбург, 2016; Бондур и Гордо, 2018], хотя их интенсивность в североамериканских лесах в среднем выше, чем в евразийских [Ситнов и Мохов, 2018].

Люди ответственны за возникновение более 90% природных пожаров, оставшаяся доля приходится на возгорания в результате молниевых явлений. В частности, в Европе более 95% пожаров вызваны деятельностью человека [Leone et al., 2009]. Метеорологические факторы играют решающую роль, когда они сочетаются таким образом, что способствуют возникновению экстремальных пожароопасных погодных условий [Flannigan and Harrington, 1988; Jolly et al., 2015]. За последние четыре десятилетия регионы, в которых наблюдаются повышенная температура и скорость ветра, длительные интервалы без осадков и пониженная относительная влажность, одновременно продемонстрировали увеличенную

продолжительность сезона пожароопасной погоды, которая, как ожидается, увеличится в условиях изменения климата в будущем [Jolly et al., 2015; Im et al., 2022; Jain et al., 2022; Richardson et al., 2022; Lund et al., 2023; Miller et al., 2024]. По мере потепления климата наблюдается усиление аэрозольного воздействия от природных пожаров [Coogan et al., 2019; Xu et al., 2020]. Прогнозируется, что с изменением климата частота природных пожаров увеличится до 50% к 2100 году во всем мире [Gao et al., 2023].

Природные пожары выбрасывают в воздух многочисленные токсичные смеси загрязняющих веществ, включая сажу, органические аэрозоли [Partanen and Sofiev, 2022; Singh, 2022; Liu and Yang, 2023]. В непосредственной близости от очага пожара уровень PM2.5 может превышать 24-часовой норматив ВОЗ более чем в 30 раз [Liu et al., 2015, 2020; Graham et al., 2021; Bolaño–Diaz et al., 2022; Storey and Price, 2022]. Загрязнение частицами на таких высоких уровнях может привести к серьезным последствиям для здоровья, особенно беременных женщин, детей, пожилых людей и людей с сердечно-легочными заболеваниями [Rappold et al., 2017; Xu et al., 2020].

Кроме того, загрязняющие вещества, выбрасываемые в результате этих пожаров, могут оставаться в воздухе в течение длительного времени, что способствует их крупномасштабному распространению (в районы, расположенные на расстоянии до тысяч километров с подветренной стороны от природных пожаров) [Hanninen et al., 2009; Gong and Wang, 2021; Holanda et al., 2023; Singh et al., 2022]. В некоторых случаях (при западном переносе) дымовые шлейфы от сибирских пожаров пересекали Тихий океан и наблюдались над побережьем Америки, а в случаях восточного переноса достигали берегов Баренцева моря [Bertschi and Jaffe, 2005; Sapkota et al., 2005; Heilman et al., 2014; Tomshin and Solovyev, 2014]. Хотя очевидно, что от природных пожаров страдает местное население, в последнее время растет озабоченность по поводу их потенциального воздействия на здоровье населения на удаленных территориях [Le et al., 2014; Duc et al., 2016; Kollanus et al., 2016; Yin et al., 2019; Magzamen et al., 2021]. На ранней стадии лесных пожаров уровень загрязняющих веществ в воздухе существенно повышается за короткий период, а затем они переносятся на большие расстояния, нанося ущерб качеству воздуха и здоровью людей [Chen et al., 2017, 2021; Cleland et al., 2021; Ye et al., 2021; Yu et al., 2023]. Эпидемиологические исследования показали, что последствия лесных пожаров могут быть причиной преждевременных родов [Heft–Neal et al., 2022; Ha et al., 2024], кардиореспираторных заболеваний [Aguilera et al., 2021; Rice et al., 2021], усугублять астму [Delfino at al., 2009; Noah et al., 2023] и приводить к увеличению случаев заболевания COVID-19 [Zhou et al., 2021] и смертности [Borchers Arriagada et al., 2020; Grant and Runkle, 2022].

Токсикологические исследования показывают, что твердые частицы от лесных пожаров более токсичны, чем частицы в равных дозах из других источников [Wegesser et al., 2009, 2010; Franzi et al., 2011; Kim et al., 2018]. В частности, дым от лесных пожаров более токсичен по сравнению с выбросами от промышленности и производства электроэнергии [Aguilera et al., 2021; Chen et al., 2021] и может приводить к более высокому (в 10 раз) риску госпитализации из-за респираторных заболеваний по сравнению с другими источниками PM2.5 [Aguilera et al., 2021]. Во всем мире > 5 % смертей по причине хронического воздействия атмосферных PM2.5 на человека, могут быть связаны с лесными пожарами [Chowdhury et al., 2020, 2022].

При лесных пожарах выделяется большое количество частиц, состоящих из золы (не менее 50%) [Jahn et al., 2020; Palm et al., 2020], элементарного углерода (5–20%) [Chakrabarty et al., 2014], гуминоподобных веществ [Kuang et al., 2015; Laskin et al., 2015], полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и их производных [Samburova et al., 2016] и переходных металлов [Jahn et al., 2020]. Неорганические элементы составляют около 10% массы [Cachier et al., 1995]. Некоторые из этих соединений являются реакционноспособными и окислительно-восстановительно активными, вызывая образование активных форм кислорода (АФК) в водной фазе. АФК играют центральную роль в химической трансформации атмосферных аэрозолей и неблагоприятном воздействии аэрозолей на здоровье, вызывая окислительный стресс [Davies, 1995; Lakshmi et al., 2009; Schieber and Chandel, 2014; Shiraiwa et al., 2023]. Например, разложение органических гидропероксидов и окислительно-восстановительный цикл хинонов могут приводить к образованию АФК, включая гидроксил ($\cdot OH$), супероксид или гидропероксил ($\cdot O_2^-/\cdot HO_2$)

и органические радикалы [McWhinney et al., 2013; Tong et al., 2018; Chowdhury et al., 2019]. Переходные металлы, такие как железо (Fe) и медь (Cu), могут способствовать образованию ·OH и органических радикалов с помощью Фентона-подобных реакций пероксидов и надкислот [Муранов, 2024; Tong et al., 2016; Fang et al., 2020; Wei et al., 2021], скорость которых значительно усиливается под влиянием фотоизлучения [Paulson et al., 2019]. Присутствие гуминоподобных веществ может усиливать Fe-опосредованное восстановление кислорода до $\cdot O_2^-$ и разрушение H_2O_2 с образованием OH.

Частицы, образующиеся при горении, содержат стабильные радикалы, так называемые экологически стойкие свободные радикалы (EPFR), которые остаются стабильными с длительным сроком жизни от нескольких дней, месяцев и даже больше, что позволяет их транспортировку на значительные расстояния [Hwang et al., 2021; Sigmund et al., 2021]. По химическим свойствам EPFR выделяют семихиноновые, феноксильные и циклопентадиенильные радикалы. EPFR могут выделяться непосредственно при неполном сгорании [Dellinger et al., 2007; Lomnicki et al., 2008] или образовываться вторично в результате химической переработки ПАУ в атмосфере [Borrowman et al., 2016]. Атмосферное аэрозольное загрязнение во время лесных пожаров характеризуется высокими концентрациями EPFR [Sigmund et al., 2021; Fang et al., 2023]. EPFR обладают окислительно-восстановительной активностью, снижают содержание кислорода и поддерживают образование АФК, включая ·OH, за счет окислительно-восстановительного цикла хиноидов [Squadrito et al., 2001; Khachatryan et al., 2011; Khachatryan and Dellinger, 2011], в связи с этим EPFR могут быть цитотоксичными и вызывать гибель клеток [Balakrishna et al., 2009].

По оценкам, представленным в работах [Kaiser et al., 2012; Xu et al., 2021], в ходе глобальных пожаров выделяются 44.6–45.5 Мт/год первичных твердых частиц (PM_{10}), 29–74 Мт/год $PM_{2.5}$, 1.8–5.3 Мт/год сажи (черного углерода) и 16–47 Мт/год органического углерода. В частности, лесные пожары являются важным источником выбросов черного углерода на территории России – в среднем около 70 тыс. тонн в год за период с 2000 по 2013 г. [Романовская и др., 2016]. Крупномасштабные задымления территории России, обусловленные лесными и лесоторфяными пожарами, наблюдаются сравнительно часто. Примером могут служить интенсивные задымления европейской территории России в 2002, 2010 и 2022 гг. [Горчаков и др., 2004; Ситнов, 2011; Рябова и др., 2024] и Сибири в 2012, 2014 и 2019 гг. [Горчаков и др., 2015; Антохин и др., 2017; Бондур и др., 2020; Воронова и др., 2020; Gorchakov et al., 2014; Kozlov et al., 2014]. Так формирование в июле 2010 г. и августе 2022 г. аномально жаркой и сухой погоды спровоцировало лесные пожары, что оказало воздействие как на уровень атмосферной радиации, так и на концентрацию атмосферных аэрозолей в Московском регионе [Горчаков и др., 2011 а,б; Ситнов, 2011; Чубарова и др., 2011; Рябова и др., 2024]. В пробах атмосферного аэрозоля в Москве, взятых в августе 2010 г., средняя массовая концентрация аэрозоля составила 917 мкг/м^3, в то время как в 2009 г. эта величина в среднем составляла ~ 50–70 мкг/м^3 [Трефилова и др., 2012].

От 80% до 90% частиц, высвобождаемых во время природных пожаров, имеют средний диаметр 0.13 мкм [Reid et al., 2005; Saarnio et al., 2010]. За период с 2003 по 2023 г. по данным службы мониторинга атмосферы Copernicus (CAMS) (https://atmosphere.copernicus.eu/) максимальное количество PM2.5, связанное с лесными пожарами, отмечалось в 2003 году и составило 36.57 Мт, минимальное 20.31 Мт в 2022 г. По оценкам CAMS, глобальные лесные пожары в 2023 г. обеспечили выброс примерно 32.51 Мт PM2.5, из которых 33% (10.71 Мт) пришлось на лесные пожары в Канаде. В 2023 году в Канаде наблюдался чрезвычайно высокий уровень активности лесных пожаров, начавшись в начале мая в провинциях Альберта, Британская Колумбия и Саскачеван, крупные лесные пожары продолжались по октябрь и охватили в общей сложности около 18 млн га. В июне в результате значительного переноса на большие расстояния дым от канадских лесных пожаров достиг Европы. В последние дни августа и в начале сентября произошел очередной перенос дыма от лесных пожаров в Канаде на большие расстояния через Атлантику, в результате чего небо над Британскими островами, а также северо-западной, центральной и южной Европой было затянуто дымкой.

В России максимальный выброс PM2.5, связанный с лесными пожарами, наблюдался в 2003 году и составил 9.83 Мт, в результате пожаров было уничтожено 23.7 млн га леса, что равно

площади всей Великобритании. По оценкам CAMS, минимальный поток PM2.5 отмечался в 2004 г. и составил 1.45 Мт. В 2023 г. поток PM2.5 составил 1.89 Мт, площадь лесных пожаров составила 4.6 млн га, причем 3.8 млн га или 83% от всех площадей лесных пожаров пришлось на 6 субъектов: Республику Саха (Якутия), Хабаровский край, Магаданскую, Амурскую, Свердловскую области и Еврейскую АО (https://rosleshoz.gov.ru/news/2023-11-17/n10778).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Насколько известно автору, пока не встречается такой подробный обзор, в котором с привлечением большого количества публикаций обобщены основные результаты исследований первичного природного аэрозольного загрязнения с указанием вклада разных источников в общий баланс загрязнения окружающей среды микродисперсионными частицами, характеристики образования и транспортировки аэрозолей, химического состава, а также воздействия на здоровье человека.

В связи с этим автор надеется, что статья будет интересна научному сообществу и представленные в работе данные будут полезны как при разработке климатических моделей с учетом аэрозольной нагрузки, так и при оценке воздействия разных факторов на здоровье населения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИДГ РАН № 125012700798-8 «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан Е.Б., Воронецкая Н.Г., Головко А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Т.С., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 3. Продукты лесных пожаров // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 9. С. 740–749.

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Бердашкинова О.И., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Онищук Н.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В. Состав воздуха над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 г. 4. Атмосферный аэрозоль. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 3. С. 214–224.

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1043–1052.

Аэрозоль и климат / Под ред. К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 191 с.

Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей: Курс лекций. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. 227 с.

Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады РАН. Науки о Земле. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477.

Бондур В.Г., Гордо К.А. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.

Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 г. и тенденции 20-летних изменений // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.

Воронова О.С., Зима А.И., Кладов В.Л., Черепанова Е.В. Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 года // Исследования Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82.

Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г., Чубарова Н.Е., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Лезина Е.А., Задорожная О.С. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля задымленной атмосферы Московского региона в 2010 году // Доклады РАН. 2011. Т. 37. № 5. С. 686–690.

Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С. Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семутникова Б.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А. Исследование состава задымлённой атмосферы

Москвы во время пожаров торфяников летом — осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 366–380.

Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Ситнов С.А., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Карпов А.В., Лезина Е.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Кузнецов Г.А., Пономарева Т.Я. Московская дымная мгла в октябре 2014 г. Вариации массовой концентрации аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 10. С. 872–878.

Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Лезина Е.А., Пономарева Т.Я., Соколов А.В. Московская дымная мгла 2010 г. Экстремальное аэрозольное и газовое загрязнение воздушного бассейна Московского региона // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 452–458.

Дивинский Л.И., Ивлев Л.С. О воде и аэрозолях вулканического происхождения в высоких слоях атмосферы // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2012. С. 254–261.

Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 365 с.

Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.

Кабанов Д.М., Круглинский И.А., Почуфаров А.О., Сакерин С.М., Сидорова О.Р., Турчинович Ю.С. Пространственное распределение и средние характеристики атмосферного аэрозоля в акватории Карского моря. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 1. С. 77–83.

Кабанов Д.М., Масловский А.С., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р. Сезонная и межгодовая характеристика аэрозоля по данным многолетних (2011–2021 гг.) измерений в Российском научном центре на архипелаге Шпицберген // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 6. С. 433–442.

Лиходед В.Г., Бондаренко В.М. Микробный фактор и Toll-подобные рецепторы в патогенезе атеросклероза // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2009. Т. 6. С. 107–112.

Муранов К.О. Реакция фентона in vivo и in vitro. Возможности и ограничения // Успехи биологической химии. 2024. Т. 64. С. 219–246.

Полькин В.В., Голобокова Л.П., Круглинский И.А., Почуфаров А.О., Сакерин С.М., Хуриганова О.И. Статистическое обобщение характеристик атмосферного аэрозоля над Белым морем (экспедиции 2003–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 10. С. 820–825.

Романовская А.А., Имшенник Е.В., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Трунов А.А. Выбросы короткоживущих климатически активных веществ антропогенного происхождения на территории России за период с 2000 до 2013 годы // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. 2016. Т. 27. № 1. С. 27–48.

Романовская А.Ю., Савин И.Ю. Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюлл. Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 36–95. doi: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.

Рябова С.А., Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Вариации концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы в летние периоды 2021 и 2022 годов по данным обсерватории «Мих-нево» // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 4. С. 5–12. doi: 10.21455/GPB2023.4-1.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Круглинский И.А., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарьин Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 447–455.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Круглинский И.А., Макаров В.И., Новигатский А.Н., Полькин В.В., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Шевченко В.П. Результаты измерений характеристик аэрозоля в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на маршруте от Балтийского моря до Баренцева моря // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 515–523.

Ситнов С.А. Спутниковый мониторинг содержаний газовых примесей атмосферы и оптических характеристик атмосферного аэрозоля над европейской территорией России в апреле–сентябре 2010 года // Доклады РАН. 2011. Т. 37. № 1. С. 102–107.

Ситнов С.А., Мохов И.И. Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и северной Америки по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2018. № 2. С. 21–37.

Трефилова А.В., Артамонова М.С., Кудерина Т.М., Губанова Д.П., Давыдов К.А., Иорданский М.А., Гречко Е.И., Минашкин В.М. Химический состав и микрофизические характеристики аэрозоля г. Москвы и Подмосковья в июне 2009 г. и на пике пожаров 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11. № 4. С. 65–82.

Трифонов К.И., Девисилов В.А. Физико-химические процессы в техносфере. М.: ФОРУМ, 2007. 240 с.

Угольников О.С. Облака и аэрозоль выше тропосферы: оптические наблюдения и новейшая история // Физика Космоса: труды 47-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв.–2 февр. 2018 г.). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 104–122.

Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 790–800.

Шевченко В.П., Копейкин В.М., Новигатский А.Н., Малафеев Г.В. Черный углерод в приводном слое атмосферы над Северной Атлантикой и морями Российской Арктики в июле–сентябре 2017 г. // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 771–776.

Яковлев М.Ю. «Эндотоксиновая агрессия» как предболезнь или универсальный фактор патогенеза заболеваний человека и животных // Успехи современной биологии. 2003. Т. 123. № 1. С. 31–40.

Яковлев М.Ю. Системная эндотоксинемия. М.: Наука, 2021. 184 с.

Agier L., Deroubaix A., Martiny N., Yaka P., Djibo A., Broutin H. Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing: aerosols stand out // Journal of The Royal Society Interface. 2013. V. 10. № 79. doi: 10.1098/rsif.2012.0814.

Aguilera R., Corringham T., Gershunov A., Benmarhnia T. Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California // Nature Communications. 2021. V. 12. doi: 10.1038/s41467-021-21708-0.

Albrecht B.A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness // Science. 1989. V. 245. № 4923. P. 1227–1230.

Alexander C., Rietschel E.T. Invited review: Bacterial lipopolysaccharides and innate immunity // Journal of Endotoxin Research. 2001. V. 7. № 3. P. 167–202.

Alfonso A., Vieytes M., Botana L. Yessotoxin, a promising therapeutic tool // Marine Drugs. 2016. V. 14. № 2. doi: 10.3390/md14020030.

Allen A.G., Oppenheimer C., Ferm M., Baxter P.J., Horrocks L.A., Galle B., McGonigle A.J.S., Duffell H.J. Primary sulfate aerosol and associated emissions from Masaya Volcano, Nicaragua // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2002. V. 107. № D23. doi: 10.1029/2002JD002120.

Al-Taiar A., Thalib L. Short-term effect of dust storms on the risk of mortality due to respiratory, cardiovascular and all-causes in Kuwait // International Journal of Biometeorology. 2014. V. 58. № 1. P. 69–77.

Altieri K.E. Hastings M.G. Peters A.J., Oleynik S., Sigman D.M. Isotopic evidence for a marine ammonium source in rainwater at Bermuda // Global Biogeochemical Cycles. 2014. V. 28. № 10. P. 1066–1080.

Altieri K.E., Fawcett S.E., Peters A.J., Sigman D.M., Hastings M.G. Marine biogenic source of atmospheric organic nitrogen in the subtropical North Atlantic // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016. V. 113. № 4. P. 925–930.

Altindag D.T., Baek D., Mocan N. Chinese yellow dust and Korean infant health // Social Science & Medicine. 2017. V. 186. P. 78–86.

Andela N., Morton D.C., Giglio L., Chen Y., van der Werf G.R., Kasibhatla P.S., DeFries R.S., Collatz G.J., Hantson S., Kloster S., Bachelet D., Forrest M., Lasslop G., Li F., Mangeon S., Melton J.R., Yue C., Randerson J.T. A human-driven decline in global burned area // Science. 2017. V. 356. № 6345. P. 1356–1362.

Andersson S.M., Martinsson B.G., Vernier J.-P., Friberg J., Brenninkmeijer C.A.M., Hermann M., van Velthoven P.F.J., Zahn A. Significant radiative impact of volcanic aerosol in the lowermost stratosphere // Nature Communications. V. 6. № 1. doi: 10.1038/ncomms8692.

Andreae M.O. Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels // World survey of climatology. V. 16, edited by A. Henderson-Sellers. Amsterdam: Elsevier, 1995. P. 341–392.

Andreae M.O., Gelencsér A. Black or brown carbon. The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols // Atmospheric Chemistry and Physics. 2006. V. 6. P. 3419–3463.

Andreas E.L. A new sea spray generation function for wind speeds up to 32 ms^{-1} // Journal of Physical Oceanography. 1998. V. 28. № 11. P. 2175–2184.

Ångström A. Atmospheric turbidity, global illumination and planetary albedo of the earth // Tellus. 1962. V. 14. № 4. P. 435–450.

Apte J.S., Marshall J.D., Cohen A.J., Brauer M. Addressing global mortality from ambient PM2.5 // Environmental Science and Technology. 2015. V. 49. № 17. P. 8057–8066.

Backer L.C., Fleming L.E., Rowan A., Cheng Y.S., Benson J.M., Pierce R.H., Zaias J., Bean J., Bossart G.D., Johnson D., Quimbo R., Baden D.G. Recreational exposure to aerosolized brevetoxins during Florida red tide events // Harmful Algae. 2003. V. 2. № 1. P. 19–28.

Balakrishna S., Lomnicki S., McAvey K.M., Cole R.B., Dellinger B., Cormier S.A. Environmentally persistent free radicals amplify ultrafine particle mediated cellular oxidative stress and cytotoxicity // Particle and Fibre Toxicology. 2009. V. 6. № 1. doi: 10.1186/1743-8977-6-11.

Banks J.R., Brindley H.E., Stenchikov G., Schepanski K. Satellite retrievals of dust aerosol over the Red Sea and the Persian Gulf // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. V. 17. № 6. P. 3987–4003.

Baxter P.J., Ing R., Falk H., Plikaytis B. Mount St-Helens eruptions — the acute respiratory effects of volcanic ash in a North-American community // Archives of Environmental & Occupational Health. 1983. V. 38. № 3. P. 138–143.

Bell M.L., Levy J.K., Lin Z. The effect of sandstorms and air pollution on causespecific hospital admissions in Taipei, Taiwan // Occupational and Environmental Medicine. 2008. V. 65. № 2. P. 104–111.

Bertschi I.T., Jaffe D.A. Long–range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific troposphere during the summer of 2003: observations of smoke plumes from Asian boreal fires // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2005. V. 110. № D5. doi: 10.1029/2004JD00513.

Biscaye P.E., Grousset F.E., Revel M., Van der Gaast S., Zielinski G.A., Vaars A., Kukla G. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland // Journal of Geophysical Research: Ocean. 1997. V. 102. № C12. P. 26765–26781.

Bolaño-Diaz S., Camargo-Caicedo Y., Tovar Bernal F., Bolaño-Ortviz T.R. The effect of forest fire events on air quality: a case study of northern Colombia // Fire. 2022. V. 5. № 6. doi: 10.3390/fire5060191.

Bond W.J., Keeley J.E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems // Trends in Ecology & Evolution. 2005. V. 20. № 7. P. 387–394.

Borchers Arriagada N., Palmer A.J., Bowman D.M., Morgan G.G., Jalaludin B.B., Johnston F.H. Unprecedented smoke-related health burden associated with the 2019–20 bushfires in eastern Australia // Medical Journal of Australia. 2020. V. 213. № 6. P. 282–283.

Borrowman C.K., Zhou S., Burrow T.E., Abbatt J.P.D. Formation of environmentally persistent free radicals from the heterogeneous reaction of ozone and polycyclic aromatic compounds // Physical Chemistry Chemical Physics. 2016. V. 18. № 1. P. 205–212.

Brovedani V., Pelin M., D'Orlando E., Poli M. Brevetoxins: Toxicological profile // Marine and freshwater toxins, edited by P. Gopalakrishnakone, V. Haddad Jr., A. Tubaro, E. Kim, W. Kem. Dordrecht: Springer, 2016. P. 113–127.

Brown S., Jenkins S., Sparks R.S.J., Odbet H., Auker M.R. Volcanic fatalities database: analysis of volcanic threat with distance and victim classification // Journal of Applied Volcanology. 2017. V. 6. № 15. doi: 10.1186/s13617-017-0067-4.

Cachier H., Liousse C., Buatmenard P., Gaudichet A. Particulate content of savanna fire emissions // Journal of Atmospheric Chemistry. 1995. V. 22. № 1–2. P. 123–148.

Chakrabarty R.K., Beres N.D., Moosmüller H., China S., Mazzoleni C., Dubey M.K., Liu L., Mishchenko M.I. Soot superaggregates from flaming wildfires and their direct radiative forcing // Scientific Reports. 2011. V. 1. № 4. doi: 10.1038/srep05508.

Chan C.C., Ng H.C. A case-crossover analysis of Asian dust storms and mortality in the downwind areas using 14-year data in Taipei // Science of The Total Environment. 2011. V. 410–411. P. 47–52.

Chen H., Samet J.M., Bromberg P.A., Tong H. Cardiovascular health impacts of wildfire smoke exposure // Particle and Fibre Toxicology. 2021. V. 18. № 2. doi: 10.1186/s12989-020-00394-8.

Chen J., Li C., Ristovski Z., Milic A., Gu Y., Islam M.S., Wang S., Hao J., Zhang H., He C., Guo H., Fu H., Miljevic B., Morawska L., Thai P., Lam Y.F., Pereira G., Ding A., Huang X., Dumka U.C. A review of biomass burning: emissions and impacts on air quality, health and climate in China // Science of The Total Environment. 2017. V. 579. P. 1000–1034.

Chen S., Huang J., Qian Y. An overview of mineral dust modeling over East Asia // Journal of Meteorological Research. 2017. V. 31. P. 633–653.

Chen Y., Ebenstein A., Greenstone M., Li H. Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River Policy // Proceedings of the National Academy Sciences United States of America. 2013. V. 110. P. 12936–12941.

Chen Y.S., Sheen P.C., Chen E.R., Liu Y.K., Wu T.N., Yang C.Y. Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan // Environmental Research. 2004. V. 95. № 2. P. 151–155.

Chen Y-S, Yang C.-Y. Effects of Asian dust storm events on daily hospital admissions for cardiovascular disease in Taipei, Taiwan // Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A. 2005. V. 72. № 5. P. 324–328.

Cheng T., Lu D., Chen H., Xu Y. Physical characteristics of dust aerosol over Hunshan Dake sandland in Northern China // Atmospheric Environment. 2005a. V. 39. № 7. P. 1237–1243.

Cheng Y.S., Mcdonald J.D., Kracko D., Irvan M.C., Zhou Y., Pierce R.H., Henry M.S., Andrea B., Naar J., Baden D.G. Concentration and particle size of airborne toxic algae (brevetoxin) derived from ocean red tide events // Environmental Science & Technology. 2005b. V. 39. № 10. P. 3443–3449.

Cheng Y.S., Villareal T.A., Zhou Y., Gao J., Pierce R.H., Wetzel D., Naar J., Baden D.G. Characterization of red tide aerosol on the Texas coast // Harmful Algae. 2005c. V. 4. № 1. P. 19–28.

Chichaeva M.A., Lychagin M.Yu., Syroeshkin A.V., Chernitsova O.V. Heavy metals in marine aerosols of the Azov sea // Geography, Environment, Sustainability. 2020. V. 13. № 2. P. 127–134.

Choobari O.A., Zawar-Reza P., Sturman A. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review // Atmospheric Research 2014. V. 138. P. 152–165.

Chowdhury P.H., He Q., Carmieli R., Li C., Rudich Y., Pardo M. Connecting the oxidative potential of secondary organic aerosols with reactive oxygen species in exposed lung cells // Environmental Science & Technology. 2019. V. 53. № 23. P. 13949–13958.

Chowdhury S., Pozzer A., Dey S., Klingmueller K., Lelieveld J. Changing risk factors that contribute to premature mortality from ambient air pollution between 2000 and 2015 // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. № 7. doi: 10.1088/1748-9326/ab8334.

Chowdhury S., Pozzer A., Haines A., Klingmüller K., Münzel T., Paasonen P., Sharma A., Venkataraman C., Lelieveld J. Global health burden of ambient PM2.5 and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols // Environment International. 2022. V. 159. doi: 10.1016/j.envint.2021.107020.

Ciminiello P., Dell'aversano C., Iacovo E.D., Fattorusso E., Forino M., Tartaglione L., Benedettini G., Onorari M., Serena F., Battocchi C., Casabianca S., Penna A. First finding of ostreopsis cf. ovata toxins in marine aerosols // Environmental Science & Technology. 2014. V. 48. № 6. P. 3532–3540.

Clarke A.D., Owens S.R., Zhou J. An ultrafine sea salt flux from breaking waves: implications for cloud condensation nuclei in the remote marine atmosphere // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2006. V. 111. № D6. doi: 10.1029/2005JD006565.

Cleland S.E., Serre M.L., Rappold A.G., West J.J. Estimating the acute health impacts of fire-originated PM2.5 exposure during the 2017 California wildfires: sensitivity to choices of inputs // GeoHealth. 2021. V. 5. № 7. doi: 10.1029/2021GH000414.

Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Kalpana Balakrishnan K., Brunekreef B., Dandona L., Dandona R., Feigin V, Freedman G., Hubbell B., Jobling A., Kan H., Knibbs L., Liu Y., Martin R., Morawska L., Pope III C.A., Shin H., Straif K., Shaddick G., Thomas M., van Dingenen R., van Donkelaar A., Vos T., Murray C.J.L., Forouzanfar M.H. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 // Lancet. 2017. V. 389. № 10082. P. 1907–1918.

Coogan S.C., Robinne F.N., Jain P., Flannigan M.D. Scientists' warning on wildfire — a Canadian perspective // Canadian Journal of Forest Research. 2019. V. 49. № 9. P. 1015–1023.

Covey J., Horwell C.J., Rachmawati L., Ogawa R., Martin-del Pozzo A.L., Armienta M.A., Nugroho F., Dominelli L. Factors motivating the use of respiratory protection against volcanic ashfall: A comparative analysis of communities in Japan, Indonesia and Mexico // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2019. V. 35. doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101066.

Crawford B., Hagan D.H., Grossman I., Cole E., Holland L., Heald C.L., Kroll J.H. Mapping pollution exposure and chemistry during an extreme air quality event (the 2018 Kilauea eruption) using a low-cost sensor network // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2021. V. 118. № 27. doi: 10.1073/pnas.2025540118.

Crooks J.L., Cascio W.E., Percy M.S., Reyes J., Neas L.M., Hilborn E.D. The association between dust storms and

daily non-accidental mortality in the United States, 1993–2005 // Environmental Health Perspectives. 2016. V. 124. № 11. P. 1735–1743.

Davies K.J.A. Oxidative stress: the paradox of aerobic life // Biochemical Society Symposium. 1995. V. 61. doi: 10.1042/bss0610001.

de Leeuw G., Andreas E.L., Anguelova M.D., Fairall C.W., Lewis E.R., O'Dowd C., Schwartz S.E. Production flux of sea spray aerosol // Reviews of Geophysics. 2011. V. 49. № 2. doi: 10.1029/2010rg000349.

de Lima E.F., Sommer C.A., Cordeiro Silva I.M., Netta A.P., Lindenberg M., Marques Alves R. Morphology and chemistry of the Puyehue volcano ashes deposited at Porto Alegre metropolitan region in June 2011 // Revista Brasiliera de Geociências. 2012. V. 42. P. 265–280.

de Morais M.G., da Silva Vaz S., de Morais E.G., Costa J.A.V. Biologically active metabolites synthesized by microalgae // BioMed Research International. 2015. V. 2015. doi: 10.1155/2015/835761.

Delangizan S., Jafari M.Z. Dust phenomenon affects on cardiovascular and respiratory hospitalizations and mortality a case study in Kermanshah, during March-September 2010–2011 // Iranian Journal of Health and Environment. 2013. V. 6. № 1. P. 65–76.

Delfino R.J., Brummel S., Wu J., Stern H., Ostro B., Lipsett M., Winer A., Street D.H., Zhang L., Tjoa T., Gillen D.L. The relationship of respiratory and cardiovascular hospital admissions to the southern California wildfires of 2003 // Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2009. V. 66. № 3. P. 189–197.

Deligne N.I., Coles S.G., Sparks R.S.J. Recurrence rates of large explosive volcanic eruptions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2010. V. 115. № B06. doi:10.1029/2009JB006554.

Dellinger B., Lomnicki S., Khachatryan L., Maskos Z., Hall R.W., Adounkpe J., McFerrin C., Truong H. Formation and stabilization of persistent free radicals // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. V. 31. № 1. P. 521–528.

Di Mauro B., Garzonio R., Rossini M., Filippa G., Pogliotti P., Galvagno M., di Cella U.M., Migliavacca M., Baccolo G., Clemenza M., Delmonte B., Maggi V., Dumont M., Tuzet F., Lafaysse M., Morin S., Cremonese E., Colombo R. Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization // The Cryosphere. V. 13. P. 1147–1165.

Dœlsch E., Saint-Macary H., Van de Kerchove V. Sources of very high heavy metal content in soils of volcanic island (La Réunion) // Journal of Geochemical Exploration. 2006. V. 8. № 1. P. 194–197.

Doney S.C., Mahowald N., Lima I., Feely R.A., Mackenzie F.T., Lamarque J.F., Rasch P.J. Impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition on ocean acidification and the inorganic carbon system // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2007. V. 104. № 37. P. 14580–14585.

Duc H.N., Bang H.Q., Quang N.X. Modelling and prediction of air pollutant transport during the 2014 biomass burning and forest fires in peninsular Southeast Asia // Environmental Monitoring and Assessment. 2016. V. 188. doi: 10.1007/s10661-016-5106-9.

Duce R.A., Laroche J., Altieri K., Arrigo K.R., Baker A.R., Capone D.G., Cornell S., Dentener F., Galloway J., Ganeshram R.S. Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean // Science. 2008. V. 320. P. 893–897.

Durant A.J., Villarosa G., Rose W.I., Delmelle P., Prata A.J., Viramonte J.G. Long-range volcanic ash transport and fallout during the 2008 eruption of Chaitén volcano, Chile // Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. 2012. V. 45–46. P. 50–64.

Elperin T., Fominykh A., Katra I., Krasovitov B. Modelling of nitric acid gas adsorption by atmospheric dust particles // Aerosol science and technology. 2019. V. 53. № 4. P. 381–393.

Engelstaedter S., Tegen I., Washington R. North African dust emissions and transport // Earth-Science Reviews. 2006. V. 79. № 1–2. P. 73–100.

Eychenne J., Cashman K., Rust A. Durant A. Impact of the lateral blast on the spatial pattern and grain size characteristics of the 18 May 1980 Mount St. Helens fallout deposit // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. № 9. P. 6018–6038.

Fang T., Hwang B.C.H., Kapur S., Hopstock K.S., Wei J., Nguyen V., Nizkorodov S.A., Shiraiwa M. Wildfire particulate matter as a source of environmentally persistent free radicals and reactive oxygen species // Environmental Science: Atmospheres. 2023. V. 3. P. 581–594.

Fang T., Lakey P.S.J., Rivera-Rios J.C., Keutsch F.N., Shiraiwa M. Aqueous-phase decomposition of isoprene hydroxy hydroperoxide and hydroxyl radical formation by fenton-like reactions with iron ions // Journal of Physical Chemistry A. 2020. V. 124. № 25. P. 5230–5236.

Flannigan M.D., Harrington J.B. A study of the relation of meteorological variables to monthly provincial area burned by wildfire in Canada (1953–80) // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1988. V. 27. № 4. P. 441–452.

Förstner U. Integrated pollution control. New York: Springer Science & Business Media, 2012. 505 p.

Franzi L.M., Bratt J.M., Williams K.M., Last J.A. Why is particulate matter produced by wildfires toxic to lung macrophages? // Toxicology and Applied Pharmacology. 2011. V. 257. № 2. P. 182–188.

Freire S., Florczyk A.J., Pesaresi M., Sliuzas R. An improved global analysis of population distribution in proximity to active volcanoes, 1975–2015 // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. V. 8. № 8. doi: 10.3390/ijgi8080341.

Gaiero D., Gassó S., Gisladottir G., Hodgkins R., McCulloch R., McKenna–Neuman C., Mockford T., Stewart H., Thorsteinsson T. High-latitude dust in the Earth system // Reviews of Geophysics. 2016. V. 54. № 2. P. 447–485.

Galanos C., Freudenberg M.A. Bacterial endotoxins: Biological properties and mechanisms of action // Mediators of Inflammation. 1993. V. 2. № 7. P. S11–S16.

Gantt B., Meskhidze N., Facchini M.C., Rinaldi M., Ceburnis D., O'Dowd C.D. Wind speed dependent size-resolved parameterization for the organic mass fraction of sea spray aerosol // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. № 16. P. 8777–8790.

Gao Y., Huang W., Xu R., Danijela Gasevic D., Liu Y., Yu W., Yua P., Yue X., Zhou G., Zhang Y., Liu H., Song J., Guo Y., Li S. Association between long-term exposure to wildfire-related PM2.5 and mortality: A longitudinal analysis of the UK Biobank // Journal of Hazardous Materials. 2023. V. 457. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131779.

Garcia-Pando C.P., Stanton M.C., Diggle P.J., Trzaska S., Miller R.L., Perlwitz J.P., Baldasano J.M., Cuevas E., Ceccato P., Yaka P., Thomson M.C. Soil dust aerosols and wind as predictorsof seasonal meningitis incidence in Niger // Environmental Health Perspectives. 2014. V. 122. № 7. P. 679–686.

Gardner C.S., Liu A.Z., Marsh D.R., Feng W., Plane J.M.C. Inferring the global cosmic dust influx to the Earth's atmosphere from lidar observations of the vertical flux of mesospheric Na // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2014. V. 119. № 9. P. 7870–7879.

Gauthier P., Sigmarsson O., Gouhier M., Haddadi B., Moune S. Elevated gas flux and trace metal degassing from the 2014–2015 fissure eruption at the Bárðarbunga volcanic system, Iceland // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. V. 121. № 3. P. 1610–1630.

Gentien P., Arzul G. Exotoxin production by gyrodinium cf. Aureolum (dinophyceae) // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1990. V. 70. № 3. P. 571–581.

Ghozikali M.G., Ansarin K., Naddafi K., Nodehi R.N., Yaghmaeian K., Hassanvand M.S., Kashani H., Jaafari J., Atafar Z., Faraji M., Ghanbarian M., Rezaei S., Seyedrezazadeh E., Goudarzi G., Yunesian M. Short-term effects of particle size fractions on lung function of late adolescents // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. № 22. P. 21822–21832.

Giannadaki D., Pozzer A., Lelieveld J. Modeled global effects of airborne desert dust on air quality and premature mortality // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. № 2. P. 957–968.

Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 72–85.

Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J.M., Holben B., Dubovik O., Lin S.-J. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2001. V. 106. № D17. P. 20255–20274.

Ginoux P., Prospero J.M., Gill T.E., Hsu N.C., Zhao M. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // Reviews of Geophysics. 2012. V. 50. № 3. doi: 10.1029/2012RG000388.

Golubeva N.I., Burtseva L.V., Gromov S.A. Heavy metals in atmospheric air in the Kara sea water area in September–October // Oceanology. 2011. V. 58. P. 870-878.

Goncharuk V.V., Lapshin V.B., Chichaeva M.A., Matveeva I.S., Samsoni-Todorov A.O., Taranov V.V., Syroezhkin A.V. Heavy metals, aluminum, and arsenic in aerosols of the world ocean // Journal of Water Chemistry and Technology. 2012. V. 34. doi: 10.3103/S1063455X12010018.

Gong P., Wang X. Forest fires enhance the emission and transport of persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons from the central Himalaya to the Tibetan Plateau // Environmental Science & Technology Letters. 2021. V. 8. № 7. P. 498–503. doi: 10.1021/acs.estlett.1c00221.

Gong S.L. A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and super-micron particles // Global Biogeochemical Cycles. 2003. V. B17. № 4. doi: 10.1029/2003gb002079.

Gong S.L., Barrie L.B., Lazare M. Canadian Aerosol Module (CAM): A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models: 2. Global sea-salt aerosol and its budgets // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2002. V. 107. № D24. doi: 10.1029/2001JD002004.

Gong S.L., Bartie L.A. Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere 1. Model development // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1997. V. 102. № D3. P. 3805–3818.

Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva T.Ya. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35. № 15. P. 5698–5721.

Goudie A.S. Desert dust and human health disorders // Environment International. 2014. V. 63. P. 101–113. doi: 10.1016/j.envint.2013.10.011.

Goudie A.S., Middleton N.J. Saharan dust storms: nature and consequences // Earth-Science Reviews. 2001. V. 56. № 1–4. P. 179–204.

Graf H.-F., Langmann B., Feichter J. The contribution of Earth degassing to the atmospheric sulfur budget // Chemical Geology. 1998. V. 147. P. 131–145.

Graham A.M., Pringle K.J., Pope R.J., Arnold S.R., Conibear L.A., Burns H., Rigby R., Borchers-Arriagada N., Butt E.W., Kiely L., Reddington C., Spracklen D.V., Woodhouse M.T., Knote C., McQuaid J.B. Impact of the 2019/2020 Australian megafires on air quality and health // Geohealt. 2021. V. 5. № 10. doi: 10.1029/2021gh000454.

Grant E., Runkle J.D. Long-term health effects of wildfire exposure: a scoping review // The Journal of Climate Change and Health. 2022. doi: 10.1016/j.joclim.2021.100110.

Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W. Ecological effects of particulate matter // Environment International. 2003. V. 29. № 2–3. doi: 10.1016/S0160-4120(02)00181-2.

Griffin D.W., Garrison V.H., Herman J.R., Shinn E.A. African desert dust in the Caribbean atmosphere: Microbiology and public health // Aerobiologia. 2001. V. 17. № 3. P. 203–213.

Grythe H., Ström J., Krejci R., Quinn P., Stohl A. A review of sea-spray aerosol source functions using a large global set of sea salt aerosol concentration measurements // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. P. 1277–1297.

Ha S., Abatzoglou J.T., Adebiyi A., Ghimire S., Martinez V., Wang M., Basu R. Impacts of heat and wildfire on preterm birth // Environmental Research. 2024. V. 252. № 4. doi: 10.1016/j.envres.2024.119094.

Halmer M.M., Schmincke H.U., Graf H.F. The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2002. V. 115. № 3–4. P. 511–528.

Han C., Hur S.D., Han Y., Lee K., Hong S., Erhardt T., Fischer H., Svensson A.M. Steffensen J.P., Vallelonga P. High-resolution isotopic evidence for a potential Saharan provenance of Greenland glacial dust // Scientific Reports. 2018. V. 8. doi: 10.1038/s41598-018-33859-0.

Hanninen O.O., Salonen R.O., Koistinen K., Lanki T., Barregard L., Jantunen M. Population exposure to fine particles and estimated excess mortality in Finland from an East European wildfire episode // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2009. V. 19. № 4. P. 414–422.

Hansen J., Sato M., Ruedy R. Radiative forcing and climate response // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. № D6. P. 6831–6864.

Heft–Neal S., Driscoll A., Yang W., Shaw G., Burke M. Associations between wildfire smoke exposure during pregnancy and risk of preterm birth in California // Environmental Research. 2022. V. 203. doi: 10.1016/j.envres.2021.111872.

Heilman W.E., Liu Y., Urbanski S., Kovalev V., Mickler R. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes // Forest Ecology and Management. 2014. V. 317. P. 70–79.

Ho H.M., Rao C.Y., Hsu H.H., Chiu Y.H., Liu C.M., Chao H.J. Characteristics and determinants of ambient fungal spores in Hualien, Taiwan // Atmospheric Environment. 2005. V. 39. № 32. P. 5839–5850.

Holanda B.A., Franco M.A., Walter D., Artaxo P., Carbone S., Cheng Y., Chowdhury S., Ditas F., Gysel-Beer M., Klimach T., Kremper L.A., Krüger O.O., Lavric J.V., Lelieveld J., Ma C., Machado L.A.T., Modini R.L., Morais F.G., Pozzer A., Saturno J., Su H., Wendisch M., Wolff S., Pöhlker M.L., Andreae, M.O., Pöschl U., Pöhlker C. African biomass burning affects aerosol cycling over the Amazon // Communications Earth & Environment. 2023. V. 4. doi: 10.1038/s43247-023-00795-5.

Holmes N.S. A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments and discussion of mechanistic implications // Atmospheric Environment. 2007. V. 41. № 10. P. 2183–2201.

Hsu S.C., Liu S.C., Kao S.J., Jeng W.L., Huang Y.T., Tseng C.M., Tsai F., Tu J.Y., Yang Y. Sources solubility and acid processing of aerosol iron and phosphorous

over the South China Sea: East Asian dust and pollution outflows vs. Southeast Asian biomass burning // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. P. 21433–21472.

Huang J., Wang T., Wang W., Li Z., Yan H. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119. № 19. P. 11398–11416.

Huang Y., Kok J.F., Kandler K., Lindqvist H., Nousiainen T., Sakai T., Adebiyi A., Jokinen O. Climate models and remote sensing retrievals neglect substantial desert dust asphericity // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. № 6. doi: 10.1029/2019GL086592.

Huneeus N., Schulz M., Balkanski Y., Griesfeller J., Prospero J., Kinne S., Bauer S., Boucher O., Chin M., Dentener F., Diehl T., Easter R., Fillmore D., Ghan S., Ginoux P., Grini A., Horowitz L., Koch D., Krol M.C., Landing W., Liu X., Mahowald N., Miller R., Morcrette J.J., Myhre G., Penner J., Perlwitz J., Stier P., Takemura T., Zender C.S. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. P. 7781–7816.

Husar R.B., Tratt D.M., Schichtel B.A., Falke S.R., Li F., Jaffe D., Gasso S., Gill T., Laulainen N.S., Lu F., Reheis M.C., Chun Y., Westphal D., Holben B.N., Gueymard C., McKendry I., Kuring N., Feldman G.C., Mc Clain C., Frouin R. J., Merrill J., DuBois D., Vignola F., Murayama T., Nickovic S., Wilson W.E., Sassen K., Sugimoto N., Malm W.C. Asian Dust events of April 1998 // Journal of Geophysical Research. 2001. V. 106. № D16. P. 18317–18330.

Hwang B., Fang T., Pham R., Wei J., Gronstal S., Lopez B., Frederickson C., Galeazzo T., Wang X., Jung H., Shiraiwa M. Environmentally persistent free radicals, reactive oxygen species generation, and oxidative potential of highway PM2.5 // ACS Earth and Space Chemistry. 2021. V. 5. № 8. P. 1865–1875.

Ilyinskaya E., Mason E., Wieser P.E., Holland L., Liu E.J., Mather T.A., Edmonds M., Whitty R.C.W., Elias T., Nadeau P.A., Schneide D., McQuaid J.B., Allen S.E.J., Oppenheimer C., Kern C., Damby D. Rapid metal pollutant deposition from the volcanic plume of Kīlauea, Hawaii // Communications Earth & Environment. 2021. V. 2. doi: 10.1038/s43247-021-00146-2.

Ilyinskaya E., Schmidt A., Mather T.A., Pope F.D., Witham C., Baxter P., Jóhannsson T., Pfeffer M., Barsotti S., Singh A., Sanderson P., Bergsson B., Kilbride B.M., Donovan A., Peters N., Oppenheimer C., Edmonds M. Understanding the environmental impacts of large fissure eruptions: aerosol and gas emissions from the 2014–2015 Holuhraun eruption (Iceland) // Earth and Planetary Science Letters, 2017. V. 472. P. 309–322.

Im U., Geels C., Hanninen R., Kukkonen J., Rao S., Ruuhela R., Sofiev M., Schaller N., Hodnebrog Ø., Sillmann J., Schwingshackl C., Christensen J.H., Bojariu R., Aunan K. Reviewing the links and feedbacks between climate change and air pollution in Europe // Frontiers in Environmental Science. 2022. V. 10. doi: 10.3389/fenvs.2022.954045.

IPCC Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2001. 893 p.

Ito A., Kawamiya M. Potential impact of ocean ecosystem changes due to global warming on marine organic carbon aerosols // Global Biogeochemical Cycles. 2010. V. 24. № 1. doi: 10.1029/2009GB003559.

Jaafari J., Naddafi K., Yunesian M., Nabizadeh R., Hassanvand M.S., Shamsipour M., Ghozikali M.G., Shamsollahi H.R., Nazmara S., Yaghmaeian K. The acute effects of short term exposure to particulate matter from natural and anthropogenic sources on inflammation and coagulation markers in healthy young adults // Science of The Total Environment. 2020. V. 735. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139417.

Jaafari J., Naddafi K., Yunesian M., Nabizadeh R., Hassanvand M.S., Shamsipour M., Ghozikali M.G., Nazmara S., Shamsollahi H.R., Yaghmaeian K. Associations between short term exposure to ambient particulate matter from dust storm and anthropogenic sources and inflammatory biomarkers in healthy young adults // Science of The Total Environment. 2021. V. 761. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.

Jaeglé L., Quinn P.K., Bates T.S., Alexander B., Lin J.-T. Global distribution of sea salt aerosols: new constraints from in situ and remote sensing observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. P. 3137–3157.

Jaegle L., Quinn P.K., Bates T.S., Alexander B., Lin J.T. Global distribution of sea salt aerosols: new constraints from in situ and remote sensing observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. № 7. P. 3137–3157.

Jaffe D., Anderson T., Covert D., Kotchenruther R., Trost B., Danielson J., Simpson W., Berntsen T., Karlsdottir S., Blake D., Harris J., Carmichael G., Uno I. Transport of Asian air pollution to North America // Geophysical Research Letters. 1999. V. 26. P. 711–714.

Jahn L.G., Polen M.J., Jahl L.G., Brubaker T.A., Somers J., Sullivan R.C. Biomass combustion produces ice-active minerals in biomass-burning aerosol and bottom ash // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. V. 117. № 36. P. 21928–21937.

Jain P., Castellanos-Acuna D., Coogan S.C.P., Abatzoglou J.T., Flannigan M.D. Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature // Nature Climate Change. 2022. V. 12. № 1. P. 63–70.

Jenkins S.F., Wilson T., Magill C., Miller V., Stewart C., Blong R., Marzocchi W., Boulton M., Bonadonna C., Costa A. Volcanic ash fall hazard and risk // Global volcanic hazards and risk, edited by S.C. Loughlin, R.S.J. Sparks, S.K. Brown, S.F. Jenkins, C. Vye-Brown. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. doi: 10.1017/CBO9781316276273.005.

Jeong G.Y. Mineralogy and geochemistry of Asian dust: dependence on migration path, fractionation, and reactions with polluted air // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. V. 20. № 12. P. 7411–7428.

Ji X., Abakumov E., Xi X. Atmosphere–ocean exchange of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Russian Arctic Ocean // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. № 22. P. 13789–13807.

Jickells T.D., Kelly S.D., Baker A.R., Biswas K., Dennis P.F., Spokes L.J., Witt M., Yeatman S.G. Isotopic evidence for a marine ammonia source // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 7. P. 359–376.

Johnson B.T. The semidirect aerosol effect: Comparison of a single-column model with large eddy simulation for marine stratocumulus // Journal of Climate. 2005. V. 18. № 1. P. 119–130.

Johnson B.T., Shine K.P., Forster P.M. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2004. V. 130. P. 1407–1422.

Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 // Nature Communications. 2015. V. 6. doi: 10.1038/ncomms8537.

Kaiser J.W., Heil A., Andreae M.O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.J., Razinger M., Schultz M.G., Suttie M., Van Der Werf G.R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 527–554.

Kalenderski S., Stenchikov G. High-resolution regional modeling of summertime transport and impact of African dust over the Red Sea and Arabian Peninsula // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2016. V. 121. № 11. doi: 10.1002/2015JD024480.

Kang L., Chen S., Huang J., Zhao S., Ma X., Yuan T., Zhang X., Xie T. The spatial and temporal distributions of absorbing aerosols over East Asia // Remote Sensing. 2017. V. 9. № 10. doi: 10.3390/rs9101050.

Kashima S., Yorifuji T., Suzuki E. Are people with a history of disease more susceptible to a short-term exposure to Asian dust? A case-crossover study among the elderly in Japan // Epidemiology. 2017. V. 28. Supplement. 1. P. S60–S66.

Kashima S., Yorifuji T., Tsuda T., Eboshida A. Asian dust and daily all-cause or cause-specific mortality in western Japan // Occupational and Environmental Medicine. 2012. V. 69. № 12. P. 908–915.

Kaskaoutis D.G., Dumka U.C., Rashki A., Psiloglou B.E., Gavriil A., Mofidi A., Petrinoli K., Karagiannis D., Kambezidis H.D. Analysis of intense dust storms over the eastern Mediterranean in March 2018: Impact on radiative forcing and Athens air quality //Atmospheric Environment. 2019. V. 209. P. 23–39.

Kaskaoutis D.G., Kambezidis H.D., Jacovides C.P., Steven M.D. Modification of solar radiation components under different atmospheric conditions in the Greater Athens area, Greece // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. № 10. P. 1043–1052.

Keene W.C., Long M.S., Reid J.S., Frossard A.A., Kieber D.J., Maben J.R., Russell L.M., Kinsey J.D., Quinn P.K., Bates T.S. Factors that modulate properties of primary marine aerosol generated from ambient seawater on ships at sea // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. V. 122. P. 11961–11990.

Kersten M., Balls P.W., van Enk R.J., Green N., Kramer K.J.M., Kriews M., Monteny F., Zwolsman J.J.G. Background concentrations for metals in the North Sea: Sediment, water, mussels and atmosphere // Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea, edited by J. Sündermann. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. P. 290–316.

Khachatryan L., Dellinger B. Environmentally persistent free radicals (EPFRs). 2. Are free hydroxyl radicals generated in aqueous solutions? // Environmental Science & Technology. 2011. V. 45. № 21. P. 9232–9239.

Khachatryan L., Vejerano E., Lomnicki S., Dellinger B. Environmentally persistent free radicals (EPFRs). 1. Generation of reactive oxygen species in aqueous

solutions // Environmental Science & Technology. 2011. V. 45. № 19. P. 8559–8566.

Kim I.N., Lee K., Gruber N., Karl D.M., Bullister J.L., Yang S., Kim T.W. Increasing anthropogenic nitrogen in the North Pacific Ocean // Science. 2014. V. 346. P. 1102–1106.

Kim Y.H., Warren S.H., Krantz Q.T., King C., Jaskot R., Preston W.T., George B.J., Hays M.D., Landis M.S., Higuchi M., DeMarini D.M., Gilmour M.I. Mutagenicity and lung toxicity of smoldering vs. flaming emissions from various biomass fuels: implications for health effects from wildland fires // Environmental Health Perspectives. 2018. V. 126. № 1. doi: 10.1289/EHP2200.

Klingebiel M., Ghate V.P., Naumann A.K., Ditas F., Pöhlker M.L., Pöhlker C., Kandler K., Konow H., Steven H. Remote sensing of sea salt aerosol below tradewind clouds // Journal of the Atmospheric Sciences. 2019. V. 76. № 5. P. 1189–1202.

Ko H.-J., Song S.J., Kim J.E., Song J.-M., Cha J.W. Compositional Characteristics of Atmospheric Aerosols during a Consecutive High Concentration Episode in Seoul, Korea // Atmosphere. 2020. V. 11. № 3. doi: 10.3390/atmos11030310.

Kok J.F., Adebiyi A.A., Albani S., Balkanski Y., Checa-Garcia R., Chin M., Colarco P.R., Hamilton D.S., Huang Y., Ito A., Klose M., Leung D.M., Li L., Mahowald N.M., Miller R.L., Obiso V., Pérez García-Pando C., Rocha-Lima A., Wan J.S., Whicker C.A. Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021a. V. 21. № 10. P. 8127–8167.

Kok J.F., Adebiyi A.A., Albani S., Balkanski Y., Checa-Garcia R., Chin M., Colarco P.R., Hamilton D.S., Huang Y., Ito A., Klose M., Li L., Mahowald N.M., Miller R.L., Obiso V., García-Pando P.C., Rocha-Lim A., Wan J.S. Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021b. V. 21. № 10. P. 8169–8193.

Kokhanovsky A.A. Aerosol optics. light absorption and scattering by particles in the atmosphere. Berlin, New York: Springer, 2008. 146 p.

Kolesnikov M.V., Matveeva I.S., Siroeshkin A.V., Pletenev S.S., Grigoryev A.V., Smirnov A.N., Balyshev A.V., Popov P.I., Ignatchenko A.V., Lapshin V.B. Heavy metals in marine aerosols of the Russian part of the Black sea. Oceanology. 2005. V. 45. № 1. P. 102–111.

Kollanus V., Tiittanen P., Niemi J.V., Lanki T. Effects of long-range transported air pollution from vegetation fires on daily mortality and hospital admissions in the Helsinki metropolitan area, Finland // Environmental Research. 2016. V. 151. P. 351–358.

Korotaeva N.E., Ivanova M.V., Suvorova G.G. Borovskii G.B. The impact of the environmental factors on the photosynthetic activity of common pine (Pinus sylvestris) in spring and in autumn in the region of Eastern Siberia // Journal of Forestry Research. 2018. V. 29. P. 1465–1473. doi: 10.1007/s11676-017-0582-5.

Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberia forest fires in summer 2012 // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35. № 15. P. 5722–5741.

Krupa S.V. Air pollution, people, and plants. St. Paul, MN: American Phytopathological Society (APS) Press, 1997. 197 p.

Kuang B.Y., Lin P., Huang X.H.H., Yu J.Z. Sources of humic-like substances in the Pearl River Delta, China: positive matrix factorization analysis of PM2.5 major components and source markers // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. № 4. P. 1995–2008.

Lakshmi S.V., Padmaja G., Kuppusamy P., Kutala V.K. Oxidative stress in cardiovascular disease // Indian Journal of Biochemistry and Biophysics. 2009. V. 46. № 6. P. 421–440.

Laskin A., Laskin J., Nizkorodov S.A. Chemistry of atmospheric brown carbon // Chemical Reviews. 2015. V. 115. № 10. P. 4335–4382.

Le G.E., Breysse P.N., McDermott A., Eftim S.E., Geyh A., Berman J.D., Curriero F.C. Canadian forest fires and the effects of long-range transboundary air pollution on hospitalizations among the elderly // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2014. V. 3. № 2. P. 713–731.

Leck C., Bigg E.K. Biogenic particles in the surface microlayer and overlaying atmosphere in the central Arctic Ocean during summer // Tellus B. 2005a. V. 57. № 4. P. 305–316.

Leck C., Bigg E.K. Source and evolution of the marine aerosol – A new perspective // Geophysical Research Letters. 2005b. V. 32. № 19. doi: 10.1029/2005gl023651.

Lee H., Honda Y., Lim Y.H., Guo Y.L., Hashizume M., Kim H. Effect of Asian dust storms on mortality in three Asian cities // Atmospheric Environment. 2014. V. 89. P. 309–317.

Lelieveld J., Evans J.S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to

premature mortality on a global scale // Nature. 2015. V. 525. № 7569. P. 367–371.

Leone V., Lovreglio R., Martín M.P., Martínez J., Vilar L. Human factors of fire occurrence in the Mediterranean // Earth observation of wildland fires in mediterranean ecosystems, edited by E. Chuvieco. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. P. 149–170.

Lewis E.R., Schwartz S.E. Sea salt aerosol production: Mechanisms, methods, measurements, and models – A critical review. Geophysical Monograph Series. V. 152. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2004. 413 p.

Lewis E.R.G., Bowers J.R., Barker B.M. Dust devil: the life and times of the fungus that causes valley Fever // PLOS Pathogens. 2015. V. 11. № 5. doi: 10.1371/journal.ppat.1004762.

Li Z., Chen L., Li M., Cohen J. Prenatal exposure to sand and dust storms and children's cognitive function in China: a quasi-experimental study // The Lancet Planetary Health. 2018. V. 5. № 2. P. e214–e222.

Liao H., Chen W.-T., Seinfeld J.H. Role of climate change in global predictions of future tropospheric ozone and aerosols // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2006. V. 111. № D12. doi: 10.1029/2005JD006852.

Liora N., Markakis K., Poupkou A., Giannaros T.M., Melas D. The Natural Emissions Model (NEMO): Description, application and model evaluation // Atmospheric Environment. 2015. V. 122. P. 493–504.

Liu J.C., Pereira G., Uhl S.A., Bravo M.A., Bell M.L. A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke // Environmental Research. 2015. V. 136. P. 120–132.

Liu M., Yang L. A global fire emission dataset using the three-corner hat method (FiTCH) // Earth System Science Data. 2023. doi: 10.5194/essd-2023-150.

Liu X., Chen S., Guo Z., Zhou H., Chen Y., Kang Y., Liu Q., Huang G., Liu T., Chen C., He Q. The influence of dusts on radiation and temperature over the eastern Asia with a regional climate model // Science of The Total Environment. 2021. V. 792. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148351.

Liu Y., Austin E., Xiang J., Gould T., Larson T., Seto E. Health impact assessment of PM2.5 attributable mortality from the September 2020 Washington State Wildfire Smoke Episode // medRxiv. 2020. doi: 10.1101/2020.09.19.20197921.

Lohmann U., Feichter J. Global indirect aerosol effects: a review // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. V. 5. P. 715–737.

Lomnicki S., Truong H., Vejerano E., Dellinger B. Copper oxide-based model of persistent free radical formation on combustion-derived particulate matter // Environmental Science & Technology. 2008. V. 42. № 13. P. 4982–4988.

Long M.S., Keene W.C., Kieber D.J., Erickson D.J., Maring H. A sea-state based source function for size- and composition-resolved marine aerosol production // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. № 3. P. 1203–1216.

Loughlin S.C., Vye-Brown C., Sparks R.S.J., Brown S.K., Jenkins S. Global volcanic hazards and risk. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015. Available at http://globalvolcanomodel.org/wp-content/uploads/2015/08/Global-Volcanic-Hazards-and-Risk-Full-book-low-res.pdf.

Lund M.T., Nordling K., Gjelsvik A.B., Samset B.H. The influence of variability on fire weather conditions in high latitude regions under present and future global warming // Environmental Research Communications. 2023. V. 5. № 6. doi: 10.1088/2515-7620/acdfad.

Luo C., Mahowald N.M., Corral J.D. Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution// Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. V. 108. № D15. doi: 10.1029/2003JD003483.

Maghrabi A.H., Al-Dosari A.F. Effects on surface meteorological parameters and radiation levels of a heavy dust storm occurred in Central Arabian Peninsula // Atmospheric Research. 2016. V. 182. P. 30–35.

Magzamen S., Gan R.W., Liu J., O'Dell K., Ford B., Berg K., Bol K., Wilson A., Fischer E.V., Pierce J.R. Differential cardiopulmonary health impacts of local and long-range transport of wildfire smoke // GeoHealth. 2021. V. 5. № 3. doi: 10.1029/2020GH000330.

Mannucci P.M., Harari S., Martinelli I., Franchini M. Effects on health of air pollution: a narrative review // Internal and Emergency Medicine. 2015. V. 10. № 6. P. 657–662.

Mårtensson E.M., Nilsson E. D., de Leeuw G., Cohen L.H., Hansson H.C. Laboratory simulations and parameterization of the primary marine aerosol production // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. V. 108. № D9. doi: 10.1029/2002JD002263.

Mason E., Wieser P.E., Liu E.J., Edmonds M., Ilyinskaya E., Whitty R.C.W., Mather T.A., Elias T., Nadeau P.A., Wilkes T.C., McGonigle A.J.S., Pering T.D., Mims F.M., Kern C., Schneider D.J., Oppenheimer C. Volatile metal emissions from volcanic degassing and lava–seawater

interactions at Kīlauea Volcano, Hawaii // Communications Earth & Environment. 2021. V. 2. № 79. doi: 10.1038/s43247-021-00145-3.

Mather T.A., Tsanev V.I., Pyle D.M., McGonigle A.J.S., Oppenheimer C., Allen A.G. Characterization and evolution of tropospheric plumes from Lascar and Villarrica volcanoes, Chile // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2004. V. 109. № D21. doi: 10.1029/2004JD004934.

Mather T.A., vol Pyle D.M., Oppenheimer C. Tropospheric volcanic aerosol // Volcanism and the Earth's atmosphere. Geophysical Monograph Series. V. 139, edited by A. Robock, C. Oppenheimer. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2003. P. 189–212.

Mather T.A., Witt M.L.I., Pyle D.M., Quayle B.M., Aiuppa A., Bagnato E., Martin R.S., Sims K.W.W., Edmonds M., Sutton A.J., Ilyinskaya E. Halogens and trace metal emissions from the ongoing 2008 summit eruption of Kīlauea volcano, Hawaii // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2012. V. 83. P. 292–323.

Matsuhashi N., Yoshioka T. Endotoxin-free dialysate improves response to erythropoietin in hemodialysis patient // Nephron. 2002. V. 92. № 3. P. 601–604.

McCormic R.A., Ludwig J.H. Climate modifications by atmospheric aerosols // Science. 1967. V. 156. № 3780. P. 1358–1359.

McWhinney R.D., Zhou S., Abbatt J.P.D. Naphthalene SOA: redox activity and naphthoquinone gas-particle partitioning // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. № 19. P. 9731–9744.

Meloni D., di Sarra A., Monteleone F., Pace G., Piacentino S., Sferlazzo D.M. Seasonal transport patterns of intense Saharan dust events at the Mediterranean island of Lampedusa // Atmospheric Research. 2008. V. 88. № 2. P. 134–148.

Miller J., Böhnisch A., Ludwig R., Brunner M.I. Climate change impacts on regional fire weather in heterogeneous landscapes of central Europe // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2024. V. 24. P. 411–428.

Miller R.L., Tegen I., Perlwitz J. Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2004. V. 109. № D4. doi: 10.1029/2003JD004085.

Min P.-K., Kim C.-W., Yun Y.-J., Chang J.-H., Chu J.-K., Lee K.-E., Han J.-Y., Park J.-W., Hong C.-S. Effect of yellow sand on respiratory symptoms and diurnal variation of peak expiratory flow in patients with bronchial asthma // Journal of Asthma, Allergy and Clinical Immunology. 2001. V. 21. № 6. P. 1179–1186.

Miyazaki Y., Kawamura K., Sawano M. Size distributions of organic nitrogen and carbon in remote marine aerosols: Evidence of marine biological origin based on their isotopic ratios // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. № 6. P. 460–472.

Monahan E.C., Spiel D.E., Davidson K.L. A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption // Oceanic whitecaps and their role in air–sea exchange processes, edited by E.C. Monahan, G. MacNiocaill. Dordrecht, the Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 1986. P. 167–174.

Mori I., Nishikawa M., Tanimura T., Quan H. Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport // Atmospheric Environment, 2003. V. 37. № 30. P. 4253–4263.

Moune S., Gauthier P.-J., Delmelle P. Trace elements in the particulate phase of the plume of Masaya Volcano, Nicaragua // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 193. № 3–4. P. 232–244.

Mu H., Battsetseg B., Ito T.Y., Otani S., Onishi K., Kurozawa Y. Health effects of dust storms: subjective eye and respiratory system symptoms in inhabitants in Mongolia // Journal of Environmental Health Sciences. 2011. V. 73. № 8. P. 18–20.

Murray C.J.L., Aravkin A.Y., Zheng P., Abbafati C., Abbas K.M., Abbasi-Kangevari M., Abd-Allah F., Abdelalim A., Abdollahi M., Abdollahpour I., Abegaz K.H., Abolhassani H., Aboyans V., Abreu Z.-J., Zhao J.T., Zhao X.-J.G., Zhao Y., Zhou M., Ziapour A., Zimsen S.R.M., Brauer M., Afshin A., Lim S.S. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // Lancet. 2020. V. 396. № 10258. P. 1223–1249.

Myriokefalitakis S., Vignati E., Tsigaridis K., Papadimas C., Sciare J., Mihalopoulos N., Kanakidou M. Global modeling of the oceanic source of organic aerosols // Advances in Meteorology 2010. V. 4. doi: 10.1155/2010/939171.

Newhall C.G., Self S. The Volcanic Explosivity Index (VEI) an Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1982. V. 87. № C2. P. 1231–1238.

Ngkelo A., Meja K., Yeadon M., Adcock I., Kirkham P. LPS induced inflammatory responses in human peripheral blood mononuclear cells is mediated through nox4 and gialpha dependent pi-3kinase signaling // Journal of Inflammation. 2012. V. 9. № 1. doi: 10.1186/1476-9255-9-1.

Nishikawa M., Kanamori S., Kanamori N., Mizoguchi T. Kosa aerosol aseolian carrier of anthropogenic material // The Science of the Total Environment. 1991. V. 107. P. 13–27.

Noah T.L., Worden C.P., Rebuli M.E., Jaspers I. The effects of wildfire smoke on asthma and allergy // Current Allergy and Asthma Reports. 2023. V. 23. P. 375–387.

Norris S.J., Brooks I.M., de Leeuw G., Smith M.H., Moerman M., Lingard J.J.N. Eddy covariance measurements of sea spray particles over the Atlantic Ocean // Atmospheric Chemistry and Physics. 2008. V. 8. № 3. P. 555–563.

O'Dowd C.D., de Leeuw G. Marine aerosol production: a review of the current knowledge // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007. V. 365. P. 1753–1774.

O'Dowd C.D., Smith M.H. Physiochemical properties of aerosols over the northeast Atlantic: Evidence for wind-speed-relatedsubmicron sea-salt aerosol production // Journal of Geophysical Research. 1993. V. 98. № D1. P. 1137–1149.

Oliver R., Ganf G. Freshwater blooms // The ecology of cyanobacteria: Their diversity in time and space, edited by B. Whitton, M. Potts, editors. Netherlands: Kluwer Academic, 2002. P. 149–194.

Oppenheimer C., Pyle D.M., Barclay J. Volcanic degassing. Special Publication. № 213. London: Geological Society, 2003. 420 p.

Ozer P. Les lithometeores en region sahelienne // International Journal of Tropical Ecology and Geography. 2001. V. 24. P. 1–317.

Paerl H. Marine plankton // The ecology of cyanobacteria: Their diversity in time and space, edited by B. Whitton, M. Potts, editors. Netherlands: Kluwer Academic, 2002. P. 121–148.

Palm B.B., Peng Q., Fredrickson C.D., Lee B.H., Garofalo L.A., Pothier M.A., Kreidenweis S.M., Farmer D.K., Pokhrel R.P., Shen Y., Murphy S.M., Permar W., Hu L., Campos T.L., Hall S.R., Ullmann K., Zhang X., Flocke F., Fischer E.V., Thornton J.A. Quantification of organic aerosol and brown carbon evolution in fresh wildfire plumes // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. V. 117. № 47. P. 29469–29477.

Panikkath R., Jumper C.A., Mulkey Z. Multilobar lung infiltrates after exposure to dust storm: the Haboob Lung Syndrome // American Journal of Medicine. 2013. V. 126. № 2. doi: 10.1016/j.amjmed.2012.08.012.

Partanen T.M., Sofiev M. Forecasting the regional fire radiative power for regularly ignited vegetation fires // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2022. V. 22. № 4. P. 1335–1346.

Perez L., Tobias A., Querol X., Künzli N., Pey J., Alastuey A., Viana M., Valero N., González-Cabré M., Sunyer J. Coarse particles from Saharan dust and daily mortality // Epidemiology. 2008. V. 19. № 6. P. 800–807.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. 1999. V. 399. P. 429–436.

Pierce R.H. Red tide (Ptychodiscus brevis) toxin aerosols: A review // Toxicon. 1986. V. 24. № 10. P. 955–965.

Pierce R.H., Henry M.S., Blum P.C., Lyons J., Cheng Y.S., Yazzie D., Zhou Y. Brevetoxin concentrations in marine aerosol: Human exposure levels during aKarenia brevisharmfulnalgal bloom // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2003. V. 70. № 1. P. 161–165.

Plane J.M.C. Atmospheric chemistry of meteoric metals // Chemical Reviews. 2003. V. 103, № 12. P. 4963–4984.

Plane J.M.C. Cosmic dust in the Earth's atmosphere // Chemical Society Reviews. 2012. V. 41. № 19. P. 6507–6518.

Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // Journal of the Air and Waste Management Association. 2006. V. 56. № 6. P. 709–742.

Pradhan B., Ki J.-S. Phytoplankton toxins and their potential therapeutic applications: A journey toward the quest for potent pharmaceuticals // Marine Drugs. 2022. V. 20. № 4. doi: 10.3390/md20040271.

Prather K.A., Bertram T.H., Grassian V.H., Deane G.B., Stokes M.D., DeMott P.J., Aluwihare L.I., Palenik B.P., Azam F., Seinfeld J.H., Moffet R.C., Molina M.J., Cappa C.D., Geiger F.M., Roberts G.C., Russell L.M., Ault A.P., Baltrusaitis J., Collins D.B., Corrigan C.E., Cuadra-Rodriguez L.A., Ebben C.J., Forestieri S.D., Guasco T.L., Hersey S.P., Kim M.J.. Lambert W.F., Modini R.L., Mui W., Pedler B.E., Ruppel M.J., Ryder O.S., Schoepp N.G., Sullivan R.C., Zhao D. Bringing the ocean into the laboratory to probe the chemical complexity of sea spray aerosol // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2013. V. 110. № 19. P. 7550–7555.

Prospero J.M. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of the southeastern United States // Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America. 1999. V. 96. № 7. P. 3396–3403.

Prospero J.M., Collard F.-X., Molinié J., Jeannot A. Characterizing the annual cycle of African dust transport to the Caribbean Basin and South America and its impact on the environment and air quality // Global Biogeochemical Cycles. 2014. V. 29. № 7. P. 757–773.

Prospero J.M., Ginoux P., Torres O., Nicholson S.E., Gill T.E. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product // Reviews of Geophysics. 2002. V. 40. № 1. doi: 10.1029/2000RG000095.

Prospero J.M., Lamb P.J. African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications // Science. 2003. V. 302. № 5647. P. 1024–1027.

Qureshi A., MacLeod M., Hungerbühler K. Modeling aerosol suspension from soils and oceans as sources of micropollutants to air // Chemosphere. 2009. V. 77. № 4. P. 495–500.

Rädlein N., Heumann K.G. Trace analysis of heavy metals in aerosols over the Atlantic ocean from Antarctica to Europe // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2006. V. 48. P. 127–150.

Ramanathan V., Crutzen P.J., Lelieveld J., Mitra A.P., Althausen D., Anderson J., Andreae M.O., Cantrell W., Cass G.R., Chung C.E., Clarke A.D., Coakley J.A., Collins W.D., Conant W.C., Dulac F., Heintzenberg J., Heymsfield A.J., Holben B., Howell S., Hudson J., Jayaraman A., Kiehl J.T., Krishnamurti T.N., Lubin D., McFarquhar G., Novakov T., Ogren J.A., Podgorny I.A., Prather K., Priestley K., Prospero J.M., Quinn P.K., Rajeev K., Rasch P., Rupert S., Sadourny R., Satheesh S.K., Shaw G.E., Sheridan P., Valero F.P.J. Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2001. V. 106. № D22. P. 28371–28398.

Rappold A.G., Reyes J., Pouliot G., Cascio W.E., Diaz-Sanchez D. Community vulnerability to health impacts of wildland fire smoke exposure // Environmental Science & Technology. 2017. V. 51. № 12. P. 6674–6682.

Reid E.A., Reid J.S., Meier M.M., Dunlap M.R., Cliff S.S., Broumas A., Perry K., Maring H. Characterization of African dust transported to Puerto Rico by individual particle and size segregated bulk analysis // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. V. 108. № D19. doi: 10.1029/2002JD002935.

Reid J.S., Koppmann R., Eck T.F., Eleuterio D.P. A review of biomass burning emissions Part II: Intensive physical properties of biomass burning // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. P. 799–825.

Rice M.B., Henderson S.B., Lambert A.A., Cromar K.R., Hall J.A., Cascio W.E., Smith P.G., Marsh B.J., Coefield S., Balmes J.R., Kamal A., Gilmour M.I., Carlsten C., Navarro K.M., Collman G.W., Rappold A., Miller M.D., Stone S.L., Costa D.L. Respiratory impacts of wildland fire smoke: future challenges and policy opportunities. An official American Thoracic Society workshop report // Annals of the American Thoracic Society. 2021. V. 18. № 6. P. 921–930.

Richardson D., Black A.S., Irving D., Matear R.J., Monselesan D.P., Risbey J.S., Squire D.T., Tozer C.R. Global increase in wildfire potential from compound fire weather and drought // Npj Climate and Atmospheric Science. 2022. V. 5. № 1. doi: 10.1038/s41612-022-00248-4.

Riquelme G., Sepúlveda J.M., Al Ghumgham Z., del Campo M., Montero C., Lagos N. Neosaxitoxin, a Paralytic Shellfish Poison toxin, effectively manages bucked shins pain, as a local long-acting pain blocker in an equine model // Toxicon. 2018. V. 141. P. 15–17.

Ro C.-U., Hwang H., Kim H., Chun Y., Grieken R.V. Single-particle characterization of four "Asian Dust" samples collected in Korea, using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis // Environmental Science Technology. 2005. V. 39. № 6. P. 1409–1419.

Rodríguez S., Alastuey A., Alonso-Pérez S., Querol X., Cuevas E., Abreu-Afonso J., Viana M., Pérez N., Pandolfi M., de la Rosa J. Transport of desert dust mixed with North African industrial pollutants in the subtropical Saharan Air Layer // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. № 13. P. 6663–6685.

Rodríguez-Pérez M.C., Ferrer M.E.F., Boada L.D., Pérez A.D.A., Aguilar M.C.D., Jerónimo J.F.F., Talavera I.G., Gangotena L.V., de la Torre A.H., Simbaña-Rivera K., de León A.C. Health impact of the Tajogaite volcano eruption in La Palma population (ISVOLCAN study): rationale, design, and preliminary results from the first 1002 participants // Environmental Health. 2024. V. 23. № 19. doi: 10.1186/s12940-024-01056-4.

Russell L.M., Moore R.H., Burrows S.M. Ocean flux of salt, sulfate, and organic components to atmospheric aerosol // Earth-Science Reviews. 2023. V. 239. doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104364.

Saarnio K., Aurela M., Timonen H., Saarikoski S., Teinila K., Makela T., Sofiev M., Koskinen J., Aalto P.P., Kulmala M., Kukkonen J., Hillamo R. Chemical Composi-

tion of fine particles in fresh smoke plumes from boreal wild-land Fires in Europe // The Science of The Total Environment. 2010. V. 408. № 12. P. 2527–2542.

Sajani S.Z., Miglio R., Bonasoni P., Cristofanelli P., Marinoni A., Sartini C., Goldoni C.A., De Girolamo G., Lauriolaet P. Saharan dust and daily mortality in Emilia-Romagna (Italy) // Occupational and Environmental Medicine. 2011. V. 68. № 6. P. 446–451.

Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D. Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in Russian sector of the Arctic Ocean // Atmosphere. 2020. V. 11. № 11. doi: 10.3390/atmos11111170.

Salomons W., Bayne B.L., Duursma E.K., Förstner U. Pollution of the North Sea: An Assessment Softcover. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988. 698 p.

Salter M.E., Nilsson E. D., Butcher A., Bilde M. On the seawater temperature dependence of the sea spray aerosol generated by a continuous plunging jet // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119. № 14. P. 9052–9072.

Samburova V., Connolly J., Gyawali M., Yatavelli R.L.N., Watts A.C., Chakrabarty R.K., Zielinska B., Moosmüller H., Khlystov A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in biomass-burning emissions and their contribution to light absorption and aerosol toxicity // Science of The Total Environment. 2016. V. 568. P. 391–401.

Samoli E., Kougea E., Kassomenos P., Analitis A., Katsouyanni K. Does the presence of desert dust modify the effect of PM10 on mortality in Athens, Greece? // Science of The Total Environment. 2011. V. 409. № 11. P. 2049–2054.

Sapkota A., Symons J.M., Kleissl J., Wang L., Parlange M.B., Ondov J., Breysse P.N., Diette G.B., Eggleston P.A., Buckley T. J. Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore city // Environmental Science and Technology. 2005. V. 39. № 1. P. 24–32.

Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. doi: 10.1029/2001GL014051.

Satheesh S.K., Moorthy K.K. Radiative effects of natural aerosols: a review // Atmospheric Environment. 2005. V. 39. № 11. P. 2089–2110.

Schieber M., Chandel N.S. ROS function in redox signaling and oxidative stress // Current Biology. 2014. V. 24. № 10. P. R453–R462.

Schmidt A., Leadbetter S., Theys N., Carboni E., Witham C.S., Stevenson J.A., Birch C.E., Thordarson T., Turnock S., Barsotti S., Delaney L., Feng W., Grainger R.G., Hort M.C., Höskuldsson Á., Ialongo I., Ilyinskaya E., Jóhannsson T., Kenny P., Mather T.A., Richards N.A.D., Shepherd J. Satellite detection, long-range transport and air quality impacts of volcanic sulfur dioxide from the 2014–15 flood lava eruption at Bárðarbunga (Iceland) // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. doi: 10.1002/2015JD023638.

Schmidt A., Ostro B., Carslaw K.S., Wilson M., Thordarson T., Mann G.W., Simmons A.J. Excess mortality in Europe following a future Laki-style Icelandic eruption // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2011. V. 108. № 38. P. 15710–15715.

Schraufnagel D.E., Balmes J.R., Cowl C.T., De Matteis S., Jung S.-H., Mortimer K., Perez–Padilla R., Rice M.B., Riojas-Rodriguez H., Sood A., Thurston G.D., To T., Vanker A., Wuebbles D.J. Air pollution and noncommunicable diseases: a review by the forum of international respiratory societies' environmental committee, Part 1: The damaging effects of air pollution // Chest. 2019. V. 155. № 2. P. 409–416.

Schulz M., Chin M., Kinne S. The aerosol model comparison project, AeroCom, phase II: Clearing up diversity // IGACtivities Newsletter. 2009. № 41. P. 2–11.

Schulz M., Textor C., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Berntsen T., Berglen T., Boucher O., Dentener F., Guibert S., Isaksen I., Iversen T., Koch D., Kirkevag A., Liu X., Montanaro V., Myhre G., Penner J., Pitari G., Reddy S., Seland Ø., Stier P., Takemura T. Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2006. V. 6. № 12. P. 5225–5246.

Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, 2nd edn. New York: John Wiley & Sons, 2006. 1225 p.

Self S. The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2006. V. 364. P. 2073–2097. doi: 10.1098/rsta.2006.1814.

Seposo X., Kondo M., Ueda K., Honda Y., Michikawa T., Yamazaki S., Nitta H. Health impact assessment of PM2.5-related mitigation scenarios using local risk coefficient estimates in 9 Japanese cities // Environment International. 2018. V. 120. P. 525–534.

Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R. Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arc-

tic // Science of the Total Environment. 2003. V. 306. P. 11–25.

Shiraiwa M., Ueda K., Pozzer A., Lammel G., Kampf C.J., Fushimi A., Enami S., Arangio A.M., Fröhlich-Nowoisky J., Fujitani Y., Furuyama A., Lakey P.S.J., Lelieveld J., Lucas K., Morino Y., Pöschl U., Takahama S., Takami A., Tong H., Weber B., Yoshino A., Sato K. Aerosol health effects from molecular to global scales // Environmental Science & Technology. 2023. V. 51. № 23. P. 13545–13567.

Sigmund G., Santín C., Pignitter M., Tepe N., Doerr S.H., Hofmann T. Environmentally persistent free radicals are ubiquitous in wildfire charcoals and remain stable for years // Communications Earth & Environment. 2021. V. 2. № 68. doi: 10.1038/s43247-021-00138-2.

Singh S. Forest fire emissions: a contribution to global climate change // Frontiers in Forests and Global Change. 2022. V. 5. doi: 10.3389/ffgc.2022.925480.

Singh S., Johnson G., Kavouras I.G. The effect of transportation and wildfires on the spatiotemporal heterogeneity of PM2.5 mass in the New York-New Jersey metropolitan statistical area // Environmental Health Insights. 2022. V. 16. doi: 10.1177/11786302221104016.

Sofiev M., Soares J., Prank M., de Leeuw G., Kukkonen J. A regional-to-global model of emission and transport of sea salt particles in the atmosphere // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2011. V. 116. № D21. doi: 10.1029/2010JD014713.

Song S.K., Shon Z.H., Choi Y.N., Son Y.B., Kang M., Han S.-B., Bae M.-S. Global trend analysis in primary and secondary production of marine aerosol and aerosol optical depth during 2000–2015 // Chemosphere. 2019. V. 224. P. 417–427.

Spaulding K.M. The effects of aerosolized brevetoxin exposure on the human respiratory system // International Journal of Global Health and Health Disparities. 2009. V. 6. P. 1. P. 64–71.

Spracklen D.V., Arnold S.R., Sciare J., Carslaw K.S., Pio C. Globally significant oceanic source of organic carbon aerosol // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. № 12. P. 711–714.

Squadrito G.L., Cueto R., Dellinger B., Pryor W.A. Quinoid redox cycling as a mechanism for sustained free radical generation by inhaled airborne particulate matter // Free Radical Biology and Medicine. 2001. V. 31. № 9. P. 1132–1138.

Stohl A., Prata A.J., Eckhardt S., Clarisse L., Durant A., Henne S., Kristiansen N.I., Minikin A., Schumann U., Seibert P., Stebel K., Thomas H.E., Thorsteinsson T., Tørseth K., Weinzierl B. Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. № 9. P. 4333–4351.

Stoiber R.E., Williams S.N., Huebert B. Annual contribution of sulfur dioxide to the atmosphere by volcanoes // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1987. V. 33. P. 1–8.

Stoll L.L., Denning G.M., Weintraub N.L. Potential role of endotoxin as a proinflammatory mediator of atherosclerosis // Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology. 2004. V. 24. № 12. P. 2227–2236.

Storey M.A., Price O.F. Statistical modelling of air quality impacts from individual forest fires in New South Wales, Australia // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2022. V. 22. № 124. P. 4039–4062.

Sun J., Zhang M.Y., Liu T.S. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960–1999: Relations to source area and climate // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2001. V. 106. № D10. P. 10325–10333.

Sweet M.J., Hume D.A. Endotoxin signal transduction in macrophages // Journal of Leukocyte Biology. 1996. V. 60. № 1. P. 8–26.

Tam E., Miike R., Labrenz S., Sutton A.J., Elias T., Davis J., Chen Y.-L., Tantisira K., Dockery D., Avol E. Volcanic air pollution over the Island of Hawai'i: emissions, dispersal, and composition. Association with respiratory symptoms and lung function in Hawai'i Island school children // Environment International. 2016. V. 92–93. P. 543–552.

Tanaka T.Y., Chiba M. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget // Global and Planetary Change. 2006. V. 52. № 1. P. 88–104.

Tegen I., Fung I. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land source modification // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1995. V. 100. № D9. P. 18707–18726.

Tegen I., Werner M., Harrison S.P., Kohfeld K.E. Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. doi: 10.1029/2003GL019216.

Textor C., Schulz M., Guibert S., Kinne S., Balkanski Y., Bauer S., Berntsen T., Berglen T., Boucher O., Chin M., Dentener F., Diehl T., Easter R., Feichter H., Fillmore D., Ghan S., Ginoux P., Gong S., Grini A., Hendricks J.,

Horowitz L., Huang P., Isaksen I., Iversen I., Kloster S., Koch D., Kirkevåg A., Kristjansson J.E., Krol M., Lauer A., Lamarque J.F., Liu X., Montanaro V., Myhre G., Penner J., Pitari G., Reddy S., Seland Ø., Stier P., Takemura T., Tie X. Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom // Atmospheric Chemistry and Physics. 2006. V. 6. P. 1777–1813.

Thalib L., Al-Taiar A. Dust storms and the risk of asthma admissions to hospitals in Kuwait // Science of The Total Environment. 2021. V. 433. P. 347–351.

Tomshin O.A., Solovyev V.S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35. № 15. P. 5742–5749.

Tong D.Q., Wang J.X.L., Gill T.E., Lei H., Wang B. Intensified dust storm activity and valley fever infection in the southwestern United States // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. № 9. P. 4304–4312.

Tong H., Arangio A.M., Lakey P.S.J., Berkemeier T., Liu F., Kampf C.J., Brune W.H., Pöschl U., Shiraiwa M. Hydroxyl radicals from secondary organic aerosol decomposition in water // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. № 3. P. 1761–1771.

Tong H., Lakey P.S.J., Arangio A.M., Socorro J., Shen F., Lucas K., Brune W.H., Pöschl U., Shiraiwa M. Reactive oxygen species formed by secondary organic aerosols in water and surrogate lung fluid // Environmental Science & Technology. 2018. V. 52. № 20. P. 11642–11651.

Trianti S.M., Samoli E., Rodopoulou S., Katsouyanni K., Papiris S.A., Karakatsani A. Desert dust outbreaks and respiratory morbidity in Athens, Greece // Environmental Health. 2017. V. 16. doi: 10.1186/s12940-017-0281-x.

Trueblood J.V., Wang X., Or V.W., Alves M.R., Santander M.V., Prather K.A., Grassian V.H. The old and the new: aging of sea spray aerosol and formation of secondary marine aerosol through OH oxidation reactions // ACS Earth and Space Chemistry. 2019. V. 3. № 10. P. 2307–2314.

Tsigaridis K., Koch D., Menon S. Uncertainties and importance of sea spray composition on aerosol direct and indirect effects // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. № 1. P. 220–235.

Tuohy A., Bertler N., Neff P., Edwards R., Emanuelsson D., Beers T., Mayewski P. Transport and deposition of heavy metals in the Ross Sea Region, Antarctica // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. V. 120. № 20. P. 10996–11011.

Turco R.P., Toon O.B., Hamill P., Whitten R.C. Effects of meteoric debris on stratospheric aerosols and gases // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1981. V. 86. № C2. P. 1113–1128.

Twomey S. Pollution and the planetary albedo // Atmospheric Environment. 1974. V. 8. № 12. P. 1251–1256.

Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds // Journal of the Atmospheric Sciences. 1977. V. 34. № 7. P. 1149–1152.

Ueda K., Nitta H., Odajima H. The effects of weather, air pollutants, and Asian dust on hospitalization for asthma in Fukuoka // Environmental Health and Preventive Medicine. 2010. V. 15. P. 6. P. 350–357.

Umann B., Arnold F., Schaal C., Hanke M., Uecker J., Aufmhoff H., Balkanski Y., Van Dingenen R. Interaction of mineral dust with gas phase nitric acid and sulfur dioxide during the MINATROC II field campaign: First estimate of the uptake coefficient from atmospheric data // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2005. V. 110. № D22. doi: 10.1029/2005JD005906.

Uno I., Eguchi K., Yumimoto K., Takemura T., Shimizu A., Uematsu M., Liu Z., Wang Z., Hara Y., Sugimoto N. Asian dust transported one full circuit around the globe // Nature Geoscience. 2009. V. 2. P. 557–560.

Van Dolah F.M. Marine algal toxins: Origins, health effects, and their increased occurrence. Environmental Health Perspectives. 2000. V. 108. № 1. P. 133–141. doi: 10.1289/ehp.00108s1133.

Viana M., Kuhlbusch T.A.J., Querol X., Alastuey A., Harrison R.M., Hopke P.K., Winiwarter W., Vallius M., Szidat S., Prévôt A.S.H., Hueglin C., Bloemen H., Wåhlin P., Vecchi R., Miranda A.I., Kasper-Giebl A., Maenhaut W., Hitzenberger R. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results // Journal of Aerosol Science. 2008. V. 39. № 10. P. 827–849.

Viel J.F., Mallet Y., Raghoumandan C., Quénel P., Kadhel P., Rouget F., Multigner L. Impact of Saharan dust episodes on preterm births in Guadeloupe (French West Indies) // Occupational and Environmental Medicine. 2019. V. 76. № 5. P. 336–340.

Vignati E., Facchini M.C., Rinaldi M., Scannell C., Ceburnis D., Sciare J., O'Dowd C.D. Global scale emission and distribution of sea-spray aerosol: sea-salt and organic enrichment // Atmospheric Environment. 2010. V. 44. № 5. P. 670–677.

Völkening J., Heumann K.G. Heavy metals in the near-surface aerosol over the Atlantic Ocean from 60° south to 54° north // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1990. V. 95. № D12. P. 20623–20632.

Wang L., Qi J.H., Shi J.H., Chen X.J., Gao H.W. Source apportionment of particulate pollutants in the atmosphere over the Northern Yellow Sea // Atmospheric Environment. 2013. V. 70. P. 425–434.

Wang Q., Saturno J., Chi X., Walter D., Lavric J.V., Moran-Zuloaga D., Ditas F., Pöhlker C., Brito J., Carbone S., Artaxo P., Andreae M.O. Modeling investigation of light-absorbing aerosols in the Amazonn Basin during the wet season // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. № 22. P. 14775–14794.

Wang Y., Zhuang G., Sun Y., An Z. Water-soluble part of the aerosol in the dust storm season—Evidence of the mixing between mineral and pollution aerosols // Atmospheric Environment. 2005. V. 39. № 37. P. 7020–7029.

Washington R., Todd M., Middleton N.J., Goudie A.S. Dust storm source areas determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and surface observations // Annals of the Association of American Geographers. 2003. V. 93. № 2. P. 297–313.

Wegesser T.C., Franzi L.M., Mitloehner F.M., Eiguren-Fernandez A., Last J.A. Lung antioxidant and cytokine responses to coarse and fine particulate matter from the great California wildfires of 2008 // Inhalation Toxicology. 2010. V. 22. № 7. P. 561–570.

Wegesser T.C., Pinkerton K.E., Last J.A. California wildfires of 2008: coarse and fine particulate matter toxicity // Environmental Health Perspectives. 2009. V. 117. № 6. P. 893–897.

Wei J., Fang T., Lakey P.S.J., Shiraiwa M. Iron-facilitated organic radical formation from secondary organic aerosols in surrogate lung fluid // Environmental Science & Technology. 2021. doi: 10.1021/acs.est.1c04334.

Wen L.S., Jiann K.T., Santschi P.H. Physicochemical speciation of bioactive trace metals (Cd, Cu, Fe, Ni) in the oligotrophic South China Sea // Marine Chemistry. 2006. V. 101. P. 104–129.

Werner M., Tegen I., Harrison S.P., Kohfeld K.E., Prentice I.C., Balkanski Y., Rodhe H., Roelandt C. Seasonal and interannual variability of the mineral dust cycle under present and glacial climate conditions // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2002. V. 107. № D4. doi: 10.1029/2002JD002365.

Westervelt D.M., Moore R.H., Nenes A., Adams P.J. Effect of primary organic sea spray emissions on cloud condensation nuclei concentrations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. V. 12. № 1. P. 89–101.

Witek M.L., Flatau P.J., Quinn P.K., Westphal D.L. Global sea-salt modeling: Results and validation against multi-campaign shipboard measurements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2007. V. 112. № D8. doi: 10.1029/2006JD007779.

Witt M., Baker A.R., Jickells T.D. Atmospheric trace metals over the Atlantic and South Indian Oceans: Investigation of metal concentrations and lead isotope ratios in coastal and remote marine aerosols // Atmospheric Environment. 2006. V. 40. P. 5435–5451. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.041.

Wu C., Lin Z., Liu X. The global dust cycle and uncertainty in CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) models // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. V. 20. № 17. P. 10401–10425. doi: 10.5194/acp-20-10401-2020.

Xiao H.W., Xiao H.Y., Luo L., Shen C.Y., Long A.M., Chen L., Long Z.H., Li D.N. Atmospheric aerosol compositions over the South China Sea: temporal variability and source apportionment // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. V. 17. № 4. P. 3199–3214.

Xiong J., Zhao T., Bai Y., Liu Y., Han Y., Guo C. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2020. V. 209. doi:10.1016/j.jastp.2020.105415.

Xu L., Zhu Q., Riley W.J., Chen Y., Wang H., Ma P.-L., Randerson J.T. The influence of fire aerosols on surface climate and gross primary production in the Energy Exascale Earth System Model (E3SM) // Journal of Climate. 2021. V. 34. P. 7219–7238.

Xu R., Yu P., Abramson M.J., Johnston F.H., Samet J.M., Bell M.L., Haines A., Ebi K.L., Li S., Guo Y. Wildfires, global climate change, and human health // The New England Journal of Medicine. 2020. V. 383. № 22. P. 2173–2181.

Yashnik S.A., Ismagilov Z.R. Problems of the soot formation in exhausts of internal combustion engines. Soot abatement by oxidation on Cu-containing ZSM-5 catalysts (Minireview) // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. С. 529–543.

Ye T., Guo Y., Chen G., Yue X., Xu R., Coêlho M.S.Z.S., Saldiva P.H.N., Zhao Q., Li S. Risk and burden of hospital admissions associated with wildfire-related PM(2.5) in Brazil, 2000-15: a nationwide time-series study // The Lancet Planetary Health. 2021. V. 5. № 9. P. E599–E607. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00173-X.

Yin S., Wang X., Zhang X., Guo M., Miura M., Xiao Y. Influence of biomass burning on local air pollution in mainland Southeast Asia from 2001 to 2016 // Environmental Pollution. 2019. V. 254. doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.117.

Yu Y., Zou W., Jerrett M., Meng Y.-Y. Acute health impact of wildfire-related and conventional PM2.5 in the United States: a narrative review // Environmental Advances. 2023. V. 12. doi: 10.1016/j.envadv.2022.100179.

Zelenski M., Taran Y., Galle B. High emission rate of sulfuric acid from Bezymianny volcano, Kamchatka // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 7005–7013.

Zelenski M.E., Fischer T., de Moor J.M., Marty B., Zimmermann L., Ayalew D., Nekrasov A., Karandashev V. Trace elements in the gas emissions from the Erta Ale volcano, Afar, Ethiopia // Chemical Geology. 2013. V. 357. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.08.022.

Zender C.S., Miller R.L., Tegen I. Quantifying mineral dust mass budgets: Terminology, constraints, and current estimates // EOS. 2004. V. 85. № 48. P. 509–512.

Zhang M., Chen J.M., Wang T., Cheng T.T., Lin L., Bhatia R.S., Havey M. Chemical characterization of aerosols over the Atlantic Ocean and the Pacific Ocean during two cruises in 2007 and 2008 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2010. V. 115. № D22. P. 1842–1851.

Zhang R.J., Han Z., Shen Z., Cao J. Continuous measurement of number concentrations and elemental composition of aerosol particles for a dust storm event in Beijing // Advances in Atmospheric Sciences. 2008. V. 25. № 1. P. 89–95.

Zhang X., Zhao L., Tong D.Q., Wu G., Dan M., Teng B. A systematic review of global desert dust and associated human health effects // Atmosphere. 2016. V. 7. № 12. doi: 10.3390/atmos7120158.

Zhang X.Y., Arimoto R., An Z.S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1997. V. 102. № D23. P. 28041–28047.

Zhang Y., Carmichael G.R. The role of mineral aerosol in tropospheric chemistry in East Asia – A model study // Journal of Applied Meteorology. 1999. V. 38. № 3. P. 353–366.

Zhang Y., Sunwoo Y., Carmichael G.R., Kotamarthi V. Photochemical oxidant processes in the presence of dust: an evaluation of the impact of dust on particulate nitrate and ozone formation // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1994. V. 33. № 7. P. 813–824.

Zhao J., Ma X., Wu S., Sha T. Dust emission and transport in northwest China: WRF-chem simulation and comparisons with multi-sensor observations // Atmospheric Research. 2020. V. 241. doi:10.1016/j.atmosres.2020.104978.

Zhou X., Josey K., Kamareddine L., Caine M. C., Liu T., Mickley L.J., Cooper M., Dominici F. Excess of COVID-19 cases and deaths due to fine particulate matter exposure during the 2020 wildfires in the United States // Science Advances. 2021. V. 7. № 33. doi: 10.1126/sciadv.abi8789.

Zhuravleva N.V., Khabibulina E.R., Ismagilov Z.R., Efimova O.S., Osokina A.A., Potokina R.R. Chemical and granulometric composition of particles of solid atmospheric aerosol including black carbon in the snowpack on the territory of the industrial zone of Novokuznetsk city // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. С. 509–519.

Zook H.A. Spacecraft measurements of the cosmic dust flux // Accretion of extraterrestrial matter throughout Earth's history, edited by B. Peucker–Ehrenbrink, B. Schmitz. New York: Springer US, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001. P. 75–92.

AEROSOL POLLUTION OF THE ATMOSPHERE (REVIEW). PART 1. SOURCES, CHEMICAL COMPOSITION, QUANTITY OF NATURAL PRIMARY AEROSOL PARTICLES AND THEIR IMPACT ON HUMAN HEALTH

© 2025 S. A. Riabova

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the RAS,
Leninsky prospect, 38, bld. 1, Moscow, 119334 Russia

e-mail: riabovasa@mail.ru

The paper provides a review of natural sources of aerosols not associated with direct or indirect human activity that make a significant contribution to total aerosol particle emissions. In carrying out these studies, the characteristics of aerosol formation, transport and chemical composition were considered. It is shown that primary natural aerosols are formed from a wide range of sources, the share of each of which depends on the location, season and time of day. In the course of the analysis of literary data, data on the chemical composition and the magnitude of the annual emission of aerosol particles of natural origin were systematized. The results of the studies showed that natural aerosol particles are characterized by wide variability of chemical composition. The paper shows that modern estimates of global emissions of natural aerosols (using measurements, modern chemical transport models, global climate models and various parameterization schemes) differ by orders of magnitude. The data on the impact of different groups of aerosol particles (mineral dust, sea salt aerosols, aerosols from volcanic activity and aerosol pollution from wildfires) on the health of the population are presented. Aerosol pollution exposure has been shown to cause adverse health effects in humans, including cardiovascular disease, cerebrovascular disease, acute lower respiratory disease, diabetes, lung cancer, adverse birth outcomes and neonatal disease, and even death, but sea salt aerosols may also have positive effects on human health (positive biological activity of some phycotoxins, in particular, essotoxin).

Keywords: aerosols, mineral dust, sea salt aerosols, fires, cosmic dust, volcanic eruption, global annual flux, human health