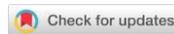


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95



### Ссылки для цитирования:

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

### Cite this article as:

Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu., Soil dust aerosol in the atmosphere: sources, quantities, properties (overview), Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, V. 109, pp. 36-95, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95

### Благодарность:

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50063\20 на тему “Изучение эолового переноса микрочастиц с пахотных почв на основе спутниковых данных”.

### Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of the scientific project No. 19-05-50063\20 “Studies on aeolian transport of microparticles from arable soils based on satellite data”.

## Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор)

© 2021 г. А. Ю. Романовская<sup>1\*\*</sup>, И. Ю. Савин<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

\*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),  
\*\*e-mail: [burmistrovaann13@mail.ru](mailto:burmistrovaann13@mail.ru).

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила в редакцию 7.12.2021, после доработки 15.12.2021,  
принята к публикации 16.12.2021

**Резюме:** Пыль является одним из основных компонентов атмосферных аэрозолей – 75% глобальной аэрозольной нагрузки. Перечислены естественные и антропогенные источники, а также методы исследования пыли. По разным оценкам средняя запыленность атмосферы варьирует

от 20 до 33 Тг, а ежегодный выброс пыли – 1 200–5 900 Тг/год. В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) сообщается о диапазоне общего прямого радиационного эффекта пыли от  $-0.56$  до  $+0.1$  Вт/м<sup>2</sup>, при этом научное понимание процессов, приводящих к такому результату, недостаточное. По степени дисперсности выделяют мелкую (<5 мкм), среднюю (5–10(20) мкм) и крупную (>20 мкм) пыль. Мелкая пыль охлаждает глобальный климат, рассеивая солнечное излучение, в то время как пыль размером более 5 мкм способствует его потеплению за счет поглощения солнечного и теплового излучения. При этом вопрос содержания крупной пыли (более 20 мкм) остается слабоизученным, и данных о ее содержании и эмиссии крайне мало. Последние исследования свидетельствуют о том, что неучтенная в моделях крупная пыль (17 Тг) способствует нагреву атмосферы в среднем еще на  $0.15$  Вт/м<sup>2</sup> (от  $0.10$  до  $0.24$  Вт/м<sup>2</sup>), а также оказывает влияние на глобальное распределение облаков и осадков. Кроме того, почвенная пыль характеризуется сложной и разнообразной формой и структурой частиц, неоднородным минералогическим и химическим составом. Благодаря своей дисперсности и большой площади поверхности пыль вступает в реакции с другими видами аэрозолей, что приводит к образованию различных пленок на поверхности частиц или к внутреннему смешению. Все это существенно изменяет оптические свойства минеральной пыли и осложняет разработку моделей при ее исследовании.

**Ключевые слова:** почвенная пыль, форма и размер пылеватых частиц, минералогический состав пыли, химический состав пыли, лидарное сканирование минеральной пыли.

## **Soil dust aerosol in the atmosphere: sources, quantities, properties (overview)**

© 2021 A. Yu. Romanovskaya<sup>2\*</sup>, I. Yu. Savin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru),*

<sup>\*\*</sup>*e-mail: [burmistrovaann13@mail.ru](mailto:burmistrovaann13@mail.ru).*

<sup>2</sup>*Institute of Environmental Engineering of RUDN University,  
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.*

*Received 7.12.2021, Revised 15.12.2021, Accepted 16.12.2021*

**Abstract:** Dust is a major component of atmospheric aerosols – 75% of the global aerosol load. Natural and anthropogenic sources are listed, as well as dust research methods. According to different estimates, the average mineral dust load in the atmosphere ranges from 20 to 33 Tg, and the annual dust emission is 1 200–5 900 Tg/year. Reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) inform about the total direct radiative forcing of dust ranging from  $-0.56$  to  $+0.1$   $\text{W/m}^2$ , with little scientific understanding of the processes leading to this result. The particle size, including soil aerosol, is divided into fine ( $<5$   $\mu\text{m}$ ), medium (5–10(20)  $\mu\text{m}$ ) and coarse ( $>20$   $\mu\text{m}$ ) dust. Fine dust cools the global climate due to dispersion of solar radiation, while coarse dust (greater than 5  $\mu\text{m}$ ) warms the climate by absorbing solar and thermal radiation. However, the coarse dust (above 20  $\mu\text{m}$ ) remains poorly investigated, with very little data on its content and emission. Recent studies suggest that coarse dust (17 Tg), missed by the global models, contributes on average  $0.15$   $\text{W/m}^2$  ( $0.10$  to  $0.24$   $\text{W/m}^2$ ) to atmospheric heating and also affects the global distribution of clouds and precipitation. In addition, soil dust is characterised by a complex and diverse particle shape and structure, heterogeneous mineralogical and chemical composition; due to its dispersion ability and large surface area dust reacts with other types of aerosols, resulting in the formation of different films on the particle surface or internal mixing. All this significantly changes the optical properties of mineral dust and complicates the development of models for its investigation.

**Keywords:** mineral soil dust, shape and size of dust particles, mineralogical composition of dust, chemical composition of dust, lidar scanning of mineral dust.

## ВВЕДЕНИЕ

Пыль является ключевым компонентом, формирующим климат на Земле. Когда пыль взаимодействует с облаками, океанами и солнечным излучением, она оказывает воздействие на живые системы нашей планеты, оказывая влияние на все – от погоды и осадков до глобального потепления.

В атмосфере существует два типа пыли, которые поднимаются сильными ветрами в засушливых районах. Мелкая пыль, как правило, приводит к понижению температуры, поскольку рассеивает солнечный свет подобно тому, как это происходит в облаках. Крупная пыль, возникающая, например, в пустыне Сахара, проявляет тенденцию к нагреву атмосферы подобно парниковым газам ([Mona et al., 2012](#); [Kok et al., 2017](#)).

Информация о количестве крупной минеральной пыли, содержащейся в атмосфере, необходима для понимания не только атмосферных явлений, на которые воздействует пыль, но и для оценки степени возможного потепления планеты (NSF – <https://www.nsf.gov/>).

Почвенная пыль является одним из основных компонентов атмосферных аэрозолей, на долю пылеватых частиц, образовавшихся на поверхности почвы, приходится около 75% глобальной аэрозольной нагрузки в атмосфере (Пирумов, 1974; Houghton et al., 2001; Mona et al., 2012; Bauer, Ganopolski, 2014; Егоров, Хабаров, 2016). Основными источниками почвенной пыли являются крупные засушливые районы мира: Африканский континент, особенно пустыня Сахара, Аравийский полуостров и Азия (восточные районы). Частицы почвенной пыли, возникшие в этих районах, могут переноситься на большие расстояния под действием сильных ветров и конвективных процессов (Mona et al., 2012; van der Does et al., 2018; Yu et al., 2019; Varga et al., 2021).

В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) сообщается о диапазоне общего прямого радиационного эффекта минеральной пыли от  $-0.56$  до  $+0.1$  Вт/м<sup>2</sup>, при этом научное понимание процессов, приводящих к такому результату, недостаточное. Косвенный эффект заключается в том, что пылевой аэрозоль изменяет свойства облаков. Частицы минеральной пыли могут действовать как ядра конденсации и таким образом определять образование первичных капель, альbedo капель, образование осадков и время жизни облаков. Все эти параметры влияют на способность облаков отражать и/или поглощать излучение и, таким образом, изменяют радиационный баланс Земли. Причиной неясности в вопросе влияния почвенных минеральных аэрозолей на радиационное воздействие является высокая изменчивость во времени и пространстве концентрации, формы частиц, распределения по размерам, показателя преломления и вертикального распределения пыли. Неполное понимание процессов образования, переноса, физико-химической эволюции и удаления минеральных аэрозолей в различных пространственных и временных масштабах является еще одним фактором, осложняю-

щим изучение влияния пыли на радиационный баланс ([Mona et al., 2012](#); [Kandler, Scheuven, 2019](#)).

Пылеватые частицы представляют серьезную опасность для окружающей среды и здоровья человека. Сердечно-сосудистые, респираторные и легочные заболевания могут быть вызваны вдыханием частиц субмикронного радиуса, поскольку они могут проникать глубоко в организм человека. Случаи глазных инфекций и таких заболеваний, как менингит и лихорадка долины (кокцидиоидомикоз – инфекционное заболевание, вызываемое вдыханием спор грибка), были зарегистрированы во время и после сильных пылевых бурь в некоторых регионах ([Фукс, 1955](#); [Пирумов, 1974](#); [Mona et al., 2012](#); [Егоров, Хабаров, 2016](#)).

Кроме того, внезапные и сильные пыльные бури могут повлиять на безопасность воздушного транспорта и автомобильных дорог, снижая видимость. Такие явления приводят к нарушениям в работе аэропортов, а также к механическим проблемам, таким как эрозия и коррозия двигателей самолетов.

**Цель статьи:** провести анализ литературных данных по содержанию аэрозольных частиц почвенного происхождения в атмосфере, ее ежегодной эмиссии, источникам, размерам, форме, физическим, химическим, оптическим свойствам и методам исследования отдельных частиц и пылевого аэрозоля в целом.

## ЗАПЫЛЕННОСТЬ АТМОСФЕРЫ, КОЛИЧЕСТВО ПЫЛИ

В настоящем обзоре будем руководствоваться следующим определением пыли (пылевого аэрозоля): **пыль в атмосфере** – мелкие, иногда микроскопические твердые частицы, взвешенные в атмосфере. Основным источником пыли является **поверхность почвы**, откуда пыль попадает в воздух при сильных ветрах, частицы органического происхождения (бактерии, споры, продукты распада), частицы пепла и дыма вулканических извержений, лесных пожаров, промышленного сжигания топлива ([Краткая географическая энциклопедия, 1962](#)).

Атмосферный мониторинг пыли – это сложная современная задача, требующая определенных знаний и надежных приборов. Атмосферный мониторинг позволяет получить информацию о:

- концентрации пыли в определенных точках;

- пространственном и временном распределении пыли на местности;
- химическом составе пыли;
- связи концентрации пыли с источниками выбросов ([http://eurolabgas.ru/pyl\\_v\\_atmosfere\\_vozduhe](http://eurolabgas.ru/pyl_v_atmosfere_vozduhe)).

### **Методы измерения пыли в атмосфере**

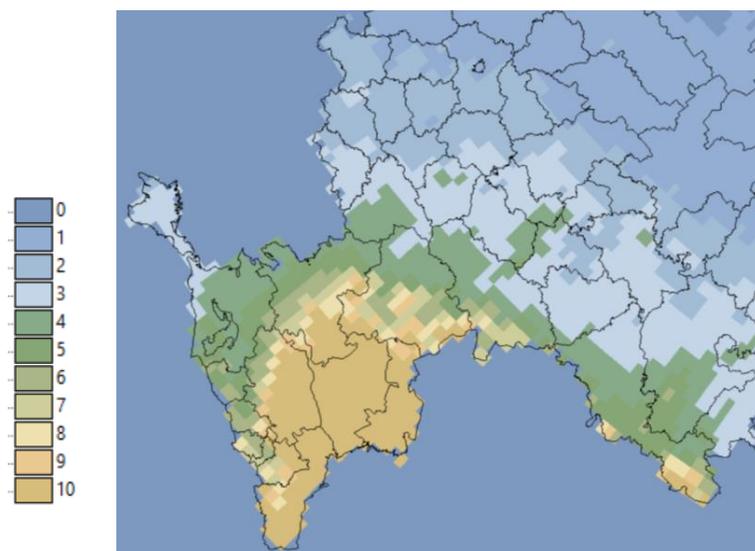
Методы исследования аэрозольных характеристик могут быть как контактными, так и дистанционными. Существует несколько основных методов измерения массовой концентрации аэрозолей в воздухе. Все способы измерения содержания пыли можно разделить на 2 группы: прямой метод (гравиметрический – взвешивание массы собранных на фильтре частиц; счетный (микроскопический) – определение общего количества пылевых частиц в единице объема воздуха (счетную концентрацию) и соотношения их размеров) и косвенный, который включает все остальные известные аппаратные методы (оптический, радиоизотопный, электроиндукционный) (<https://medwest.ru/catalog/14/903>). В свою очередь все приборы для количественного определения пыли в воздухе можно разделить на две группы: приборы для отбора проб и анализирующие приборы ([Kalashnikova, Sokolik, 2003](#); [Егоров, Хабаров, 2016](#); [Мамаева, 2016](#)). Методы исследования почвенной пыли, спровоцированной дефляционными процессами, рассмотрены в предыдущей работе авторов ([Романовская, Савин, 2020](#)).

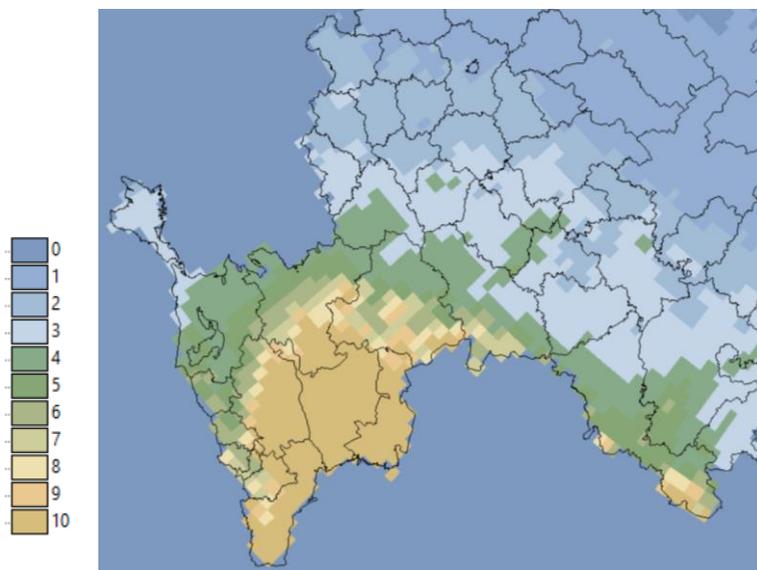
Выбор метода зависит от конкретной цели исследований. В последнее время благодаря быстро развивающимся технологиям широко применяются оптические методы. Качественную характеристику пыли определяют фотометрическим методом с помощью ультрафиолетового фотометра.

В работах Пронина С.П. с соавторами приведен нестандартный оптический метод измерения массовой концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе по измерению контраста в изображении тест-объекта. Предлагаемый метод может быть реализован на видеокамерах, устанавливаемых на улицах и уличных перекрестках городов ([Пронин и др., 2010](#); [Кононова, Пронин, 2017](#)).

К оптическому методу относятся спутниковые исследования аэрозолей по изменению оптической плотности атмосферы, а также лидарное зондирование атмосферы и контроль ее качества по изменению коэффициента ослабления лазерного излучения, который коррелирует с аэрозольной плотностью атмосферы. В связи с этим интенсивно развиваются методы моделирования оптических свойств пылевого аэрозоля.

С точки зрения мониторинга, спутниковые наблюдения посредством пассивных датчиков, таких как Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Spinning Enhanced Visible Infrared Imager (SEVIRI), Multiangle Imaging Spectrometer (MISR), Ozone Monitoring Instrument (OMI) и в последнее время Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), являются очень важными инструментами для отслеживания пылевых шлейфов и идентификации источников пыли. Усовершенствованные алгоритмы поиска, разработанные для этих датчиков, в настоящее время предоставляют очень надежную информацию об оптической глубине аэрозоля (AOD) и его мелкой/крупной фракции ([Freedman et al., 2020](#); [She et al., 2018](#); [Mona et al., 2012](#)) (рис. 1).





**Рис. 1.** Пример карт среднегодового содержания пыли в атмосфере (слева, Tg) и количество пыльных дней (справа, дни/год) над югом Европейской части России, полученных на основе анализа спутниковых данных (источник:

[https://atmosphere.copernicus.eu/charts/cams/particulate-matter-forecasts?facets=Family,Aerosols&time=2021120200,3,2021120203&projection=classical\\_global&layer\\_name=composition\\_pm2p5](https://atmosphere.copernicus.eu/charts/cams/particulate-matter-forecasts?facets=Family,Aerosols&time=2021120200,3,2021120203&projection=classical_global&layer_name=composition_pm2p5)).

**Fig. 1.** Example maps of average annual atmospheric dust content (left, Tg) and number of dusty days (right, days/year) over southern European Russia derived from satellite data analysis (source:

[https://atmosphere.copernicus.eu/charts/cams/particulate-matter-forecasts?facets=Family,Aerosols&time=2021120200,3,2021120203&projection=classical\\_global&layer\\_name=composition\\_pm2p5](https://atmosphere.copernicus.eu/charts/cams/particulate-matter-forecasts?facets=Family,Aerosols&time=2021120200,3,2021120203&projection=classical_global&layer_name=composition_pm2p5)).

Благодаря большому пространственному и временному охвату, спутниковые пассивные наблюдения используются для характеристики специфических циклических процессов пыли. Например, Кауфман с соавт. (Kaufman et al., 2005) оценили поток трансатлантического переноса и осаждения пыли с помощью наблюдений спектрорадиометра MODIS. Более того, используя

аэрозольные продукты MODIS Deep Blue, Ginoux et al. ([Ginoux et al., 2012](#)) разделили источники пыли на природные и антропогенные и оценили их вклад и интенсивность выбросов на глобальном уровне. Sun et al. ([2019](#)) предложили метод мониторинга пылевых бурь на основании данных MODIS (Lands Surface Reflectance Database), который был верифицирован с помощью наземных наблюдений MİCAPS (Система комплексного анализа и обработки метеорологической информации) и аэрозольного продукта для мониторинга озона OMI A1. Хотя спутниковое дистанционное зондирование часто рассматривается как мощный инструмент для изучения оптических свойств аэрозолей ([Zhang et al., 2020](#); [Jin et al., 2019](#); [Kaufman et al., 2005](#)) и оценки циклического поведения пылевого аэрозоля ([Wang et al., 2021](#)), оно имеет несколько важных недостатков, в частности мониторингу пыли мешает облачность, а результаты мониторинга краев облаков, поверхности земли с высокой отражательной способностью и краев пыли нуждаются в улучшении ([Sun et al., 2019](#)).

Лидар (lidar – light detection and ranging) обеспечивает самое высокое вертикальное разрешение (порядка десятков метров) для исследования взаимодействия аэрозоля с облаками, его послойного распределения, и возможность выполнения ряд других сопутствующих измерений. В настоящее время лидары достигли высокой степени надежности и используются региональными сетями для проведения долгосрочных, самосогласованных и хорошо откалиброванных измерений свойств аэрозоля. Подобные сети включают федерацию нескольких европейских исследовательских групп, созданную для организации самосогласованной аэрозольной климатологии – European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) (<http://www.earlinet.org/>), the Asian Dust Network (AD-Net) (<http://www-lidar.nies.go.jp/AsiaNet/>), основанную в 1998 г. для получения 4D перспектив переноса пыли в Азии с использованием распределенных лидарных площадок в странах Азии; the Micro-pulse Lidar Network (MPL-Net) (<http://mplnet.gsfc.nasa.gov/>) – объединенная сеть систем микроимпульсных лидаров (MPL), предназначенная для измерения вертикальной структуры аэрозолей и облаков. Все эти сети включены в Global Atmosphere Watch (GAW) Global Aerosol Lidar Observation Network (GALION). Глобальная

информация о вертикальных профилях оптических свойств и слоистости аэрозолей и облаков предоставляется CALIOP (Cloud-Aerosol lidar with Orthogonal Polarization), а также лидаром CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) установленным, на спутнике, который проводит измерения практически непрерывно с июня 2006 ([Mona et al., 2012](#)). CALIOP и другие спутниковые радиометры были использованы для оценки переноса и осаждения потока пылевых аэрозолей из Северной Африки по трансатлантическому направлению ([Yu et al., 2019](#)).

Huang et al. ([2015](#)), Ansmann et al. ([2011](#)) представили комбинированный лидарно-фотометрический подход для разделения оптических эффектов, вызванных слабо деполяризующими свет мелкими частицами и сильно деполяризующими свет крупными частицами пепла.

Wagner et al. ([2013](#)) оценили эффективность определенных настроек работы лидара и фотометра для определения оптических и микрофизических свойств пылевых частиц неправильной формы. Более того, работа Nemuc et al. ([2013](#)) подтверждает надежность комбинированного метода лидар + фотометр для оценки массовой концентрации пыли Сахары, сравнивая данные, полученные с помощью многоволнового деполяризационного лидара Raman lidar, и прогнозы, полученные с помощью Региональной атмосферной модели пыли – the Dust Regional Atmospheric Model (DRAM).

Mamouri и Ansmann ([2017](#)) усовершенствовали этот метод для разделения тонко- и крупнодисперсной пыли и далее выявили их соответствующие массовые концентрации.

Синергетический подход лидар/радар является весьма перспективным. Лидар Raman получает обратные сигналы от диоксида кремния, которые могут быть использованы в качестве индикатора (трассера) минеральной пыли. Показана общая применимость использования таких возвращающихся сигналов Raman для определения концентрации минеральной пыли в пылевых шлейфах Восточной Азии. Более подробное описание лидаров и актуальных лидарных технологий (Raman Lidar, Ceilometer, Backscatter

lidar, HSRL, Multi-wavelength HSRL/Raman lidar) приведено в обзоре L. Mona et al. (2012).

### Содержание пыли в атмосфере

Оценить содержание минеральной пыли в планетарном масштабе – сложная задача, ученые пытаются ее решить с помощью глобальных моделей. Примером такого подхода может служить модель the Global Aerosol Climatology Project (GACP) (Tegen et al., 1997), разработанная Европейским центром среднесрочного прогнозирования погоды (ECMWF).

В дальнейшем была разработана ModelE AGCM, которая позволяет оценить глобальное распределение пыли с учетом метеорологических условий и особенностей поверхности и является продуктом NASA (Schmidt et al., 2006; Miller et al., 2006). Модель доступна на сайте NASA: <https://www.giss.nasa.gov/tools/modelE/>.

Эти и многие другие модели включены в комплекс AeroCom (*Aerosol Comparison between Observations and Model projects*): GISS, Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART), Community Atmosphere Model (CAM), Model for Atmospheric Transport and Chemistry (MATCH), Model for Ozone And Related chemical Tracers (MOZART), Integrated Massively Parallel Atmospheric Chemical Transport (IMPACT), Laboratoire d'Optique Atmo-sphérique (LOA) (Huneus et al., 2011).

Согласно модели GACP, ежегодный выброс пыли в мире составляет 1 200 Тг (Тг – тераграмм, 1 Тг =  $10^9$  кг =  $10^{12}$  г), причем вклад естественных и антропогенных источников запыления считается одинаковым. Средняя годовая запыленность атмосферы Земли составляет 20.2 Тг, включая 8.9 Тг глинистых частиц (0.1–1.0 мкм) и 11.3 Тг илистых (1–10 мкм) (Miller et al., 2006; Tegen et al., 1997).

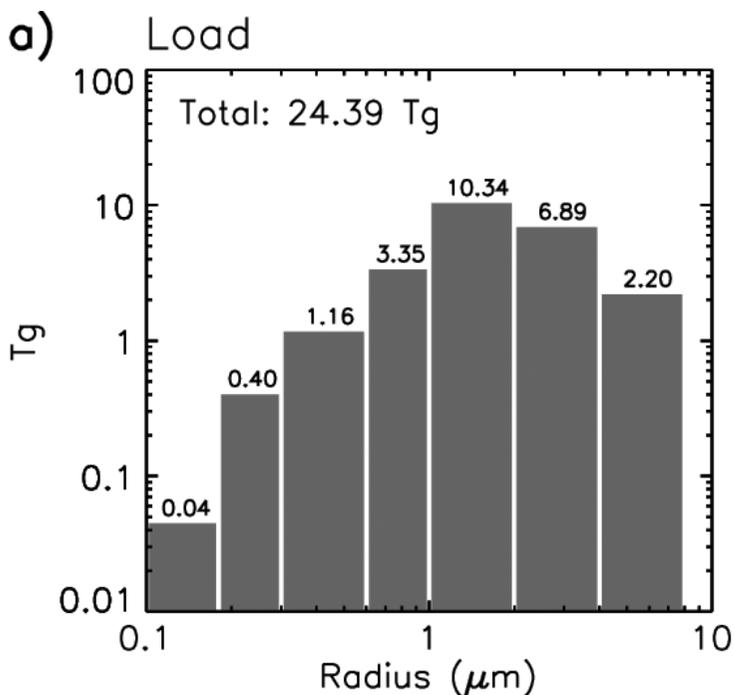
Согласно ModelE, ежегодный выброс пыли в атмосферу составляет 1 578 Тг, из них 189 Тг глинистых частиц и 1 390 Тг ила, среднегодовая запыленность атмосферы достигает 24.4 Тг. Илистые частицы составляют 80% от общего количества пыли, при этом наибольшая доля приходится на частицы размером 1–2 мкм (рис. 1) (Miller et al., 2006).

В работе Bauer, Ganiopolski (2014) отмечено среднегодовое содержание пыли 19.2 Тг, минеральная пыль составляет 60% от

сухой массы атмосферного аэрозоля в целом, среднее пребывание пыли (“время жизни” пылевого аэрозоля) в атмосфере около 4 дней, в среднем поток пылевых выбросов достигает 1 840 Тг в год ([Textor et al., 2006](#)). По данным [Houghton et al. \(2001\)](#), минеральная пыль – существенный компонент атмосферных аэрозолей, общий объем выбросов составляет от 1 000 до 5 900 Тг в год.

Однако по данным Национального научного фонда США (NSF), а также на основании научных исследований [A. Adebisi и J. Kok \(Adebisi, Kok, 2020\)](#), в атмосфере Земли содержится гораздо больше пыли, чем предполагает моделирование, причиной служит крупная пыль, масса которой достигает 17 Тг, что в 4 раза превышает количество, рассчитанное посредством современных климатических моделей AeroCom. Под крупной пылью авторы понимают минеральные частицы пыли размером 5–20 мкм, поскольку в большинстве моделей недооценивается вклад частиц, начиная с размера 5 мкм ([Kok et al., 2017](#)), а частицы размером более 20 мкм часто исключаются из расчетов, хотя в недавних исследованиях в атмосфере было измерено содержание частиц размером более 20 мкм ([Ryder et al., 2019](#)), однако подобных данных слишком мало для включения этой фракции в расчеты при моделировании.

По оценкам современных глобальных моделей, запыленность атмосферы частицами диаметром менее 10 мкм (PM<sub>10</sub>) варьирует в широких пределах от ~6 до 30 Тг<sup>4-7</sup> ([Kok et al., 2017](#)). Причины заниженных оценок при моделировании кроются в том, что крупные частицы быстро выводятся из расчетов, поскольку теоретически они должны быстрее оседать под действием гравитационных сил, однако, как говорилось выше, это не так ([Maring et al., 2003](#); [Ulanowski et al., 2007](#)). Исследования в Сахаре подтверждают, что турбулентное и конвекционное вертикальное перемешивание частиц в пылевом слое препятствует гравитационному осаждению крупной фракции пыли, тем самым продляя “время жизни” крупной пыли в атмосфере. Сильные ветры способны переносить крупные кварцевые частицы (> 100 мкм) в Арктику, так что и их можно обнаружить, например, в Исландии ([van der Does et al., 2018](#); [Varga et al., 2021](#)).



**Рис. 2.** Глобальная среднегодовая пылевая нагрузка (Tg) на атмосферу с учетом размера частиц ([Miller et al., 2006](#)).

**Fig. 2.** Global and annual average dust load (Tg) at the top of atmosphere as a function of particle size ([Miller et al., 2006](#)).

Еще одной причиной служит морфология частиц, а именно их форма, неоднородная структура и размеры, которые сложно параметризовать и ввести в уравнения. Большинство моделей строится на предположении, что частицы имеют сферическую или близкую к ней форму (теория Ми), что на самом деле далеко от реальности ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)). Для частиц сферической формы расчетная скорость осаждения выше, чем для частиц неправильной формы.

Последние исследования ([Adebiyi, Kok, 2020](#); [Kok et al., 2017](#)) основываются на сравнительном анализе результатов, полученных с помощью комплекса самых распространенных и широко

используемых глобальных климатических моделей AeroCom, и компиляции данных десятков работ, основанных на прямом измерении (“in situ”) пыли, которые были опубликованы за последние годы и взяты за основу. Также непосредственные измерения “in situ” проводились авторами с летательных аппаратов.

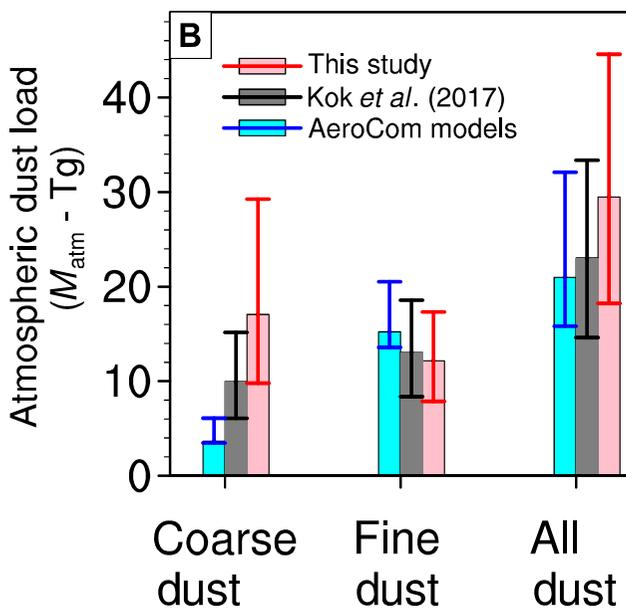
В первом исследовании ([Kok et al., 2017](#)) было установлено, что доля глинистых частиц (0.1–1.0 мкм) в среднем составляет 4.3% (3.5–5.7% при доверительном интервале 95%) от массы пылевого аэрозоля с размером пылеватых частиц  $\leq 20$  мкм (PM<sub>20</sub>), что существенно меньше, чем 5–35%, полученных в результате моделирования. Авторы также вычислили среднегодовые выбросы пыли в атмосферу для PM<sub>10</sub> – 1 700 (1 000–2 700) Тг в год, для PM<sub>20</sub> – 3 000 (1 700–4 900) Тг в год; запыленность атмосферы частицами PM<sub>10</sub> – 20 (13–29) Тг, а PM<sub>20</sub> – 23 (14–33) Тг.

В последнем исследовании Adebisi, Kok ([2020](#)) утверждают, что в среднем 58% (50–69%, доверительный интервал 95%) от общей массы пыли в атмосфере приходится на крупную пыль, и это существенно превышает оценки глобальных моделей, где вклад крупной пыли в среднем составляет 19% (6–31%). На рисунке 3 представлены гистограммы, позволяющие сравнить содержание крупной и мелкой пыли в атмосфере, рассчитанное по моделям AeroCom (голубой цвет), рассчитанное в предыдущем исследовании ([Kok et al., 2017](#)) на основании спутниковых, лидарных данных и прямых измерений (серый цвет), и рассчитанное в последнем исследовании ([Adebisi, Kok, 2020](#)). По последним данным, среднее содержание крупной пыли около 17 Тг (от 10 до 29 Тг), по моделям AeroCom – 4 Тг (от 3.5 до 6 Тг), то есть модели не учитывают три четверти крупной пыли. Согласно рисунку 2 среднее содержание мелкой пыли, по Adebisi и Kok ([2020](#)), около 12 Тг, общее содержание пыли (размером от 1 до 20 мкм) в среднем достигает 29 Тг.

Мелкая пыль охлаждает глобальный климат, рассеивая солнечное излучение, в то время как крупная пыль (более 5 мкм) способствует его потеплению за счет поглощения солнечного и теплового излучения ([Kok et al., 2017](#)). Учитывая этот факт, авторы пришли к заключению, что неучтенная в моделях крупная пыль (17 Тг) способствует нагреву атмосферы в среднем еще на 0.15

Вт/м<sup>2</sup> (от 0.10 до 0.24 Вт/м<sup>2</sup>), а также оказывает влияние на глобальное распределение облаков и осадков.

В работе Wang et al. (2021) использовался лидар Micro Pulse Lidar (MPL) и солнечный фотометр (CE318) Aerosol Robotic NETwork (AERONET) для изучения пыли пустынь северо-западного Китая. По результатам этих исследований выяснилось, что пыль концентрируется преимущественно в тропосфере на высоте <6 км, среднее массовое содержание пыли в приземном слое составляет  $905 \pm 635$  мкг/м<sup>2</sup>.



**Рис. 3.** Содержание пыли (Tg) разных фракций в атмосфере: крупная пыль – coarse dust ( $D = 5.0\text{--}20$  мкм), мелкая пыль – fine dust ( $D = 0.1\text{--}5.0$  мкм), общая пыль – all dust ( $D = 0.1\text{--}20$  мкм). Панели погрешностей представлены для доверительного интервала 95% (Adebiyi, Kok, 2020).

**Fig. 3.** The corresponding atmospheric dust load (Tg) integrated for the coarse dust ( $D = 5.0\text{--}20$   $\mu\text{m}$ ), fine dust ( $D = 0.1\text{--}5.0$   $\mu\text{m}$ ), and all dust ( $D = 0.1\text{--}20$   $\mu\text{m}$ ). The error bars in represent the 95% confidence interval (Adebiyi, Kok, 2020).

## ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЫЛИ В АТМОСФЕРЕ И ИХ ВКЛАД В ОБЩУЮ ЗАПЫЛЕННОСТЬ

Пыли по своему происхождению делятся на пыли естественного происхождения и искусственного (антропогенного) ([Трифонов, Девисилов, 2007](#); [Егоров, Хабаров, 2016](#); [Новиков, 2003](#); [Ивлев, Довгалоук, 1999](#); и многие др.).

Источниками пыли **естественного** происхождения являются: почвенная пыль, эрозия, пыльные бури, разрушение и выветривание горных пород, вулканические извержения (вулканическая пыль), лесные (мелкий пепел), степные, торфяные пожары, испарение с поверхности морей, а также космическая пыль.

**Образование почвенной пыли** – явление сальтации частиц. Минеральная “почвенная” пыль вносит основной вклад в глобальную аэрозольную нагрузку атмосферы ([Miller et al., 2006](#); [Andreae, 1995](#); [Tegen et al., 1997](#); [Фукс, 1955](#)). Поверхность суши Земли служит важным источником атмосферного аэрозоля (до 50% по массе всех аэрозольных частиц). Образование частиц от этого первичного источника сводится к механическому разрушению и выдуванию почвенного слоя (дефляции) и проявляется в так называемом сальтационном механизме движения частиц ([Береснев, Грязин, 2008](#); Кондратьев и др., 1983).

Известно, что вертикальные скорости турбулентных потоков в реальной атмосфере превышают 1.5 м/с, что оказывается достаточным, чтобы поднять частицу на неопределенно большую высоту, где ее дальнейшее движение будет определяться атмосферной циркуляцией. Пороговая скорость ветра, вызывающего сальтацию начально покоящихся частиц, должна быть пропорциональна их массе и размерам ([Береснев, Грязин, 2008](#); [Фукс, 1955](#)).

Все усиливающиеся удары сальтирующей частицы по мере ее перемещения в направлении ветра вызывают движение частиц более крупных и более мелких, чем она сама. Они также вовлекаются в прыжковые движения по направлению потока ветра. Песчинки иногда рикошетируют от поверхности, повторяя свой прыжок, иногда зарываются в песок и передают свой импульс другим песчинкам, которые начинают перекачиваться или, в свою очередь, подсакивают вверх. Таким образом, процесс переноса ча-

стиц носит характер цепной реакции. Крупные частицы обычно перекатываются по поверхности, не испытывая прыжков, а самые крупные из них (размером более 1 мм) вообще остаются неподвижными. Самая тонкая фракция частиц испытывает эффективную сальтацию и переходит в конечном счете в аэрозольное состояние.

Почвы представляют собой наиболее мощный источник аэрозольных частиц. Вдали от моря и промышленных районов они практически полностью обуславливают химический состав аэрозольных частиц в нижних слоях атмосферы. Косвенные оценки позволяют предполагать, что по массе почва дает около 50% всех аэрозольных частиц в атмосфере ([Ивлев, Довгальук, 1999](#)). Значительное количество аэрозолей в атмосфере связано с пыльными бурями, которые заносят пыль далеко в океаны и даже переносят ее, например, из Африки через Атлантический океан в Америку ([Ивлев, Довгальук, 1999](#)). В Атлантике, начиная от побережья Западной Африки и почти до центра океана, существует значительная по масштабам постоянного выноса сахарской пыли область, которая именуется у мореплавателей “морем мрака” ([Трифонов, Девисилов, 2007](#)).

Абсолютная продукция почвенных частиц составляет не менее  $1-5 \cdot 10^8$  т/год (100–500 Тг/год). Оценивая количество частиц горных пород и почвенных частиц, поступающих в атмосферу вследствие естественных процессов, Е. Гольдберг получил величины в пределах  $1-5 \cdot 10^8$  т/год. Г. Робинсон и Е. Робинс оценили средний выброс частиц равным  $2 \cdot 10^8$  т/год (200 Тг/год). Ж. Петерсон и Х. Юнге при экстраполяции количества естественной и образовавшейся в результате сельскохозяйственных работ пыли, поднятой ветром над США, получили близкую величину –  $2.5 \cdot 10^8$  т/год (250 Тг/год) ([Ивлев, 1982](#)). Наиболее вероятно, что эти значения сильно занижены.

По оценкам О.П. Петренчук из почвы поступает в атмосферу  $9.6 \cdot 10^8$  т/год аэрозольного вещества. Часть пыли, осевшей на земную поверхность, может попадать в атмосферу вторично. Эффективность вторичного ветрового захвата пылевых частиц не менее 10% ([Ивлев, 1982](#)).

По данным Adebisi, Kok (2020), пыль из пустынь является ключевым компонентом атмосферного аэрозоля, по массе она составляет около 70%, поглощает около 25% коротковолнового излучения.

Частицы почвенного происхождения с радиусами меньше 0.1 мкм могут образовываться, в частности, при кристаллизации на поверхности почвы солей, растворенных в грунтовых водах. С. Тумей оценил мощность генерации таких частиц, как  $10^4$ – $10^5$  частиц/см<sup>2</sup> (Ивлев, Довгалюк, 1999; Twomey, 1977). Особенно интенсивно выделение мелких частиц в атмосферу происходит на солончаковых почвах. По измерениям, проведенным в пустыне Кара-Кумы, вклад солончаков в общее содержание аэрозолей составляет примерно 20–30% (Ивлев, Довгалюк, 1999).

**Морская соль** дает по массе приблизительно 20% вещества диспергированной фазы. Максимум в распределении по размерам приходится на солевые частицы диаметром около 0.3 мкм. Частицы морского происхождения могут проникать далеко в глубь суши. Образование и разрыв мелких пузырьков на морской поверхности приводит к тому, что кроме морских солей в воздух поступают также частицы из органического вещества. Они могут играть важную роль в оптических явлениях в приземном слое атмосферы (Трифонов, Девисилов, 2007; Ивлев, Довгалюк, 1999).

Мощными источниками пылевой материи являются **вулканы**. Эти частицы вместе с газами вулканического происхождения поднимаются в атмосферу на высоту более 20 км, причем самые мелкие частицы могут существовать в стратосфере на протяжении нескольких лет. Несмотря на эпизодичность извержений можно оценить их среднегодовую мощность примерно в  $10^8$  т (100 Тг) (Береснев, Грязин, 2008), 200 Тг, по данным Л.С. Ивлева (1982). По данным Kokhanovsky (2008), эта величина составляет 30 Тг в год. Е. Гольдберг оценил выброс продуктов вулканических извержений в атмосферу величиной в 150 Тг/год. Наименьшее значение равно 25 Тг/год. Наиболее мощные извержения вулканов сильно загрязняют верхние слои атмосферы, но для нижних слоев вулканы как загрязнители имеют лишь локальное значение (Ивлев, 1982; Трифонов, Девисилов, 2007).

**Космическая пыль.** В атмосферу попадает 100–200 млн метеоритов или около 1–5 Тг космического вещества в год, ряд оценок дает значительно меньшее количество – 0.01 Тг/год, без учета мелкодисперсной фракции ([Ивлев, Довгалюк, 1999](#)). Доля пылевой материи внеземного происхождения незначительна и составляет приблизительно 10% от общего содержания аэрозольных частиц в нижней стратосфере, с высотой увеличиваясь до 80–100% ([Kokhanovsky, 2008](#); [Ивлев, Довгалюк, 1999](#)).

**Биологический компонент.** Как правило, вклад биологического компонента (пыльца, споры, грибки, микробы, вирусы, насекомые, фрагменты растений и животных и т. д.) в общую массу взвешенных частиц атмосферы невелик. Тем не менее, эти аэрозоли могут играть важную роль как в региональном, так и в планетарном масштабе. В течение коротких периодов или в отдельных местах они могут составлять более 50% аэрозольной массы (например, при цветении в атмосферу почти одновременно попадает большое количество пыльцы). Вирусы и бактерии могут прикрепляться к минеральным частицам и перемещаться на большие расстояния, поглощать и рассеивать свет: они могут флуоресцировать при облучении пучком ультрафиолетового света. Все это еще больше осложняет моделирование оптических характеристик пыли ([Ивлев, 1982](#); [Cadle, 1966](#); [Wittmaack et al., 2005](#); [Kokhanovsky, 2008](#)).

**Продукты сгорания растительности.** В результате лесных пожаров (естественный источник) и сжигания отходов лесоразработок (антропогенный источник) образуется преимущественно сажа, которая может поглощать заметную долю падающей на Землю солнечной радиации, и пепел. В результате лесных, травяных и других видов пожаров образуется около 5 Тг взвешенных частиц в год ([Kokhanovsky, 2008](#)). Это небольшое количество, тем не менее, локально эти аэрозоли оказывают существенное влияние на жизнь людей (могут стать причиной заболеваний человека, животных и растений; снижают видимость; изменяют тепловой баланс), а также влияют и на глобальный климат. Сажа (black carbon) часто собирается в цепочкообразные структуры, что делает невозможным использование сферических моделей частиц при оценке их

свойств. Показатель преломления сажи варьирует в зависимости от ее структуры и образовавшейся цепочки.

При длительном совместном существовании сажа захватывается крупными частицами дисперсионных аэрозолей, в результате образуются частицы смешанных аэрозолей, спектр размеров которых подобен спектру размеров аэрозолей дисперсионного происхождения (Ивлев, 1982; Tegen et al., 1997). По оценке, полученной глобальной экстраполяцией данных о лесных пожарах в США, доля массы продуктов сгорания растительности по всему земному шару варьирует от 80 до 150 Тг/год.

Jaenicke (2005) оценивает вклад биологического компонента в образование атмосферных первичных частиц приблизительно в 1 000 Тг/год, минеральной пыли – 2 000 Тг/год и морской соли – 3 300 Тг/год. По данным Landolt-Bornstein (1988), опубликованном в книге А.А. Kokhanovsky (2008), поступление в атмосферу минеральной пыли составляет 7–1 800 Тг/год, биологическая компонента составляет 80 Тг/год, морская соль – 500–2 000 Тг/год, вулканический аэрозоль (включая твердые, жидкие и газообразные частицы) – 4–90 Тг/год, дым, пепел и сажа от лесных пожаров – 5–150 Тг/год. Tegen et al. (1997) получили следующие данные по ежегодной эмиссии пыли разными источниками и ее массовой концентрации в атмосфере (табл. 2).

К **антропогенным** источникам пылевых аэрозолей, в первую очередь, следует отнести сельскохозяйственное производство, затем промышленность и транспорт.

**Сельскохозяйственное производство.** Растущий спрос на товары сельхозпроизводства создает предпосылки для перевода естественных лесов и лугов в сельскохозяйственные поля и пастбища. Переход от естественной растительности к сельскохозяйственным культурам увеличивает подверженность почвы ветровой эрозии.

Половина верхнего слоя почвы на планете была потеряна за последние 150 лет в результате дефляции. Для оценки способности почвы противостоять сдуванию ветром широко используется дефлируемость в связи с относительной простотой ее определения. Дефлируемость характеризует скорее податливость почв ветровой эрозии, чем их сопротивляемость.

Ветровой эрозии обычно подвергаются несвязные почвы, обладающие свойством сыпучести. Связные почвы, не обладающие сыпучестью, редко подвергаются ветровой эрозии по причине весьма высокой противодефляционной стойкости.

Для качественной оценки противодефляционной стойкости почв по результатам определения критической скорости ветра Г.П. Глазуновым и Лимом в 1989 г. была предложена шкала.

Помимо эрозии на качество почвы влияют и другие аспекты сельского хозяйства. Эти воздействия включают уплотнение, потерю структуры почвы, деградацию питательных веществ и засоление почвы, что также способствует инициации процесса сальтации и последующей дефляции. Кроме образования почвенного аэрозоля (пыли) в атмосфере, увеличивается последующее отложение пылевых осадков в ручьях и реках, засоряя эти водные пути и вызывая сокращение численности рыбы и других видов (<https://www.worldwildlife.org/threats/soil-erosion-and-degradation>).

**Таблица 2.** Вклад различных источников в среднегодовой выброс пыли в атмосферу и массовые концентрации различных типов пылевых аэрозолей (Tegen et al., 1997)

**Table 2.** Contribution of different sources to the annual average atmospheric dust emission and mass concentrations of different types of dust aerosols (Tegen et al., 1997)

Тип	Ежегодный выброс, Тг/год	Средняя концентрация, мг/м <sup>2</sup>	Оптическая толщина (средняя)	Оптическая толщина (максимальная)
Морская соль	5 900	22.4	0.007	0.02
Почвенная пыль (1–10 мкм)	1 000	21.6	0.007	0.59
Почвенная пыль (<1 мкм)	250	14.7	0.022	0.85
Сажистый углерод	12	0.3	0.003	0.05

Weiss et al. (2013) отметили снижение качества воды в озере Симко (Канада), связанное с чрезмерным поступлением фосфора в последние десятилетия. По оценкам различных исследований, 25–50% общего количества фосфора, поступающего в озеро, приходится на осаждение взвешенных частиц из атмосферы. Оголение почвы весной из-за отсутствия растительного покрова наряду с нарушением почвенного покрова в результате сельскохозяйственной деятельности приводит к повышенной подверженности почв ветровой эрозии и выбросу пыли в атмосферу. Данное исследование демонстрирует новый метод составления карты приоритетных областей для целенаправленного внедрения передовых методов борьбы с пылеобразованием (ветровой эрозией), которые могут быть полезны в сельскохозяйственных районах как в пределах, так и за пределами воздушного бассейна озера Симко. В работе представлена новая концепция, которая объединяет тип почвы и тип землепользования для определения эмиссии пыли в комбинации с системой прогнозирования ветровой эрозии (WEPS), учитывает почасовую вариацию скорости ветра и ежемесячные изменения почвенного покрова по мере роста культур.

Zucca et al. (2021), Muhs et al. (2014), Ginoux et al. (2012), Mahowald et al. (2004) выделяют в качестве мощного источника пыли временные (эфемерные) водоемы, имеющие как естественное, так и антропогенное происхождение, особенно если речь идет о временных ручьях, каналах, озерах и т. д., которые используются в целях орошения и обводнения территорий. После пересыхания подобных водоемов наблюдается локальное увеличение концентрации пыли в атмосфере. Несмотря на то, что сами районы источников являются засушливыми или гипераридными, действие воды очевидно по наличию эфемерных ручьев, рек, озер и пляжей. Большинство крупных источников на протяжении четвертичного периода были затоплены, о чем свидетельствуют глубокие аллювиальные отложения. Многие источники связаны с районами, где воздействие человека хорошо документировано, например, Каспийское и Аральское моря, бассейн реки Тигр-Евфрат, юго-запад Северной Америки и лёссовые земли в Китае (Prospero et al., 2002).

**Промышленная пыль** возникает в процессе производства. В зависимости от материала, из которого пыль образована, она может быть органической и неорганической. Органическая пыль бывает растительного (древесная, хлопковая, мучная, табачная, чайная) и животного (шерстяная, костяная) происхождения. Неорганическая пыль подразделяется на минеральную (кварцевая, цементная и т. д.) и металлическую (стальная, чугунная и т. д.).

Значительная часть промышленной пыли – смешанного происхождения, т. е. состоит из частиц неорганических и органических или, будучи органической, включает в себя частицы минеральной и металлической пыли. К смешанным видам пыли относят каменноугольную пыль, содержащую частицы угля, кварца и силикатов, а также пыли, образующиеся в химических и других производствах ([Егоров, Хабарова, 2016](#); [Петрянов-Соколов, 2007](#)). Источниками интенсивного пылеобразования также является оборудование приготавительного отделения (дробилки, мельницы, сита и др.), транспортное оборудование и т. п.

В случае промышленных аэрозолей наибольшая доля выбрасываемых в атмосферу частиц приходится на продукты сгорания.

**Транспорт.** Особое внимание в работах, посвященных исследованию воздушных загрязнений, уделяется автомобильному транспорту. В выхлопных газах автомобиля обычно содержится очень большое количество разнообразных частиц диаметром 0.02–0.06 мкм и небольшое – крупных. Однако в среднем общая масса твердых частиц составляет около 0.08% от массы потребляемого двигателем горючего ([Ивлев, 1982](#)).

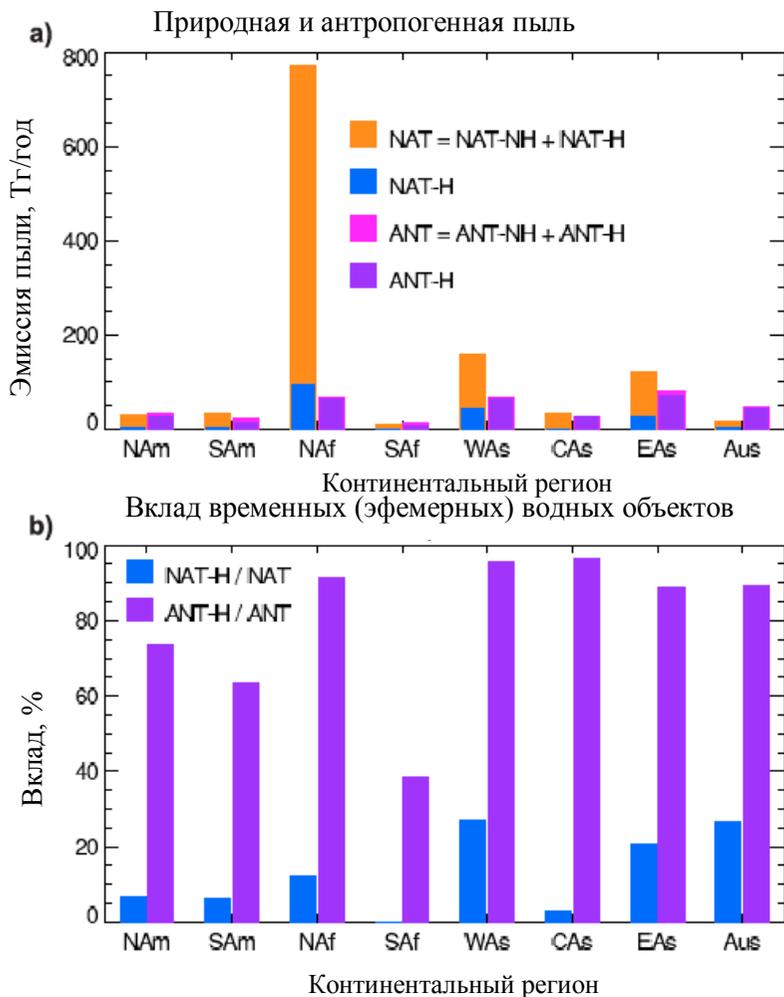
Гораздо больше частиц поступает в атмосферу в результате износа автомобильных шин, дорожного покрытия и тормозных колодок. По данным Emissions Analytics (<https://www.emissionsanalytics.com/news/pollution-tyre-wear-worse-exhaust-emissions>), только от легковых автомобилей в Европе и США ежегодно образуется около 0.3 Тг “резины”. Эти частицы попадают в воздух, почву и водотоки. Твердые частицы (NEE – non-exhaust emissions) – это частицы, попадающие в воздух в результате износа тормозов, шин, дорожного покрытия и взвеси дорожной пыли во время эксплуатации автомобиля. В настоящее

время считается, что NEE составляют большую часть первичных твердых частиц, выбрасываемых автомобильным транспортом: 60% от  $PM_{2.5}$  и 73% от  $PM_{10}$ . По данным ученых ([Harrison et al., 2012](#); [Baensch-Baltruschat et al., 2020](#)), ежегодная эмиссия твердых частиц в результате износа шин составляет  $\sim 3.4$  Тг, а вклад твердых частиц от шин и дорожного покрытия в  $PM_{10}$  достигает 11%.

#### **Вклад различных источников в общее содержание пыли**

Genoux et al. (2012) в своих исследованиях разделили источники пыли на две категории: естественные и антропогенные, – оценили вклад каждого источника в общую эмиссию пылевых частиц, сравнили полученные результаты с литературными данными. Под антропогенными преимущественно подразумевались источники сельскохозяйственного происхождения. Исследования проводились с помощью MODIS Deep Blue Aerosol Products и AERONET, полученные показатели оптической глубины аэрозоля и пыли и другие индексы сравнивались с результатами, полученными посредством TOMS и OMI. В качестве еще одного источника пыли авторы выделяют временные водоемы как естественного, так и антропогенного происхождения.

Авторы рассчитали выбросы от этих источников, глобальные годовые выбросы составляют 1 536 Тг. Было обнаружено, что 20% от общего объема приходится на территории, в той или иной мере покрытые растительностью. Эти территории включают Сахель, Казахстан, Индо-Гангский бассейн, восточный Китай, несколько штатов Австралии, Аргентина и высокогорные равнины США. Выявлено, что 30% глобальных выбросов пыли происходит с территорий с временными (эфемерными) водными объектами. В Западной Африке на их долю приходится только 18% региональных выбросов пыли, в то время как во всех других регионах их вклад как минимум в два раза больше. Процентные доли временных (эфемерных) водных объектов могли бы быть еще больше, если бы была возможность включить в исследование гидрологические объекты размером менее 1 км (например, временные ручьи, небольшие озера и пруды). Примечательно, что в Австралии временные (эфемерные) водные объекты, природные и антропогенные, вносят наибольший вклад в общий объем выбросов – 71% (рис. 4).



**Рис. 4. а)** Среднегодовой выброс пыли (Тг/год) в Северной Америке (NAm), Южной Америке (SAm), Северной Африке (NAf), Южной Африке (SAf), Западной и Средней Азии (WAs), Центральной Азии (CAs), Восточной Азии (EAs) и Австралии (Aus) от природных (NAT-H + NAT-NH), антропогенных (ANT-H + ANT-NH) источников, а также от

природных (NAT-H) и антропогенных (ANT-H) источников с временными (эфемерными) водными объектами, покрывающими более 10% квадрата сетки; **б)** Процентный вклад временных (эфемерных) водных объектов в природные и антропогенные выбросы пыли для каждого континентального региона ([Ginoux et al., 2012](#)).

**Fig. 4. a)** Annual mean emission ( $Tg\ yr^{-1}$ ) over North America (NAM), South America (SAM), North Africa (NAF), South Africa (SAF), West Asia-Middle East (WAS), Central Asia (CAS), East Asia (EAS), and Australia (AUS) from natural (NAT-H + NAT-NH), anthropogenic (ANT-H + ANT-NH), and natural (NAT-H) and anthropogenic (ANT-H) sources with more than 10% ephemeral water bodies per grid cell; **b)** The percentage contribution of ephemeral water bodies to natural and anthropogenic emissions for each continental region ([Ginoux et al., 2012](#)).

На долю природных источников пыли в мире приходится 75% выбросов, на антропогенные источники приходится 25%. Современный вклад землепользования (антропогенный) в выброс пыли остается предметом дискуссий, значения варьируются от 10% ([Tegen et al., 2004](#)) до 50% ([Tegen et al., 1996](#); [Mahowald et al., 2004](#)) из-за больших расхождений в моделировании. [Ginoux et al. \(2012\)](#) в качестве антропогенных источников пыли выделили регионы, где доля культивируемых земель превышала 30%, согласно атласу землепользования Klein Goldewijk (2001). Карты природных и возделываемых источников были введены в модель переноса пыли, и антропогенная доля современных выбросов пыли была оценена примерно в 25%. Однако разделение природных и антропогенных источников почвенной пыли остается неточным ([Ginoux et al., 2012](#)).

На Северную Африку приходится 55% глобальных выбросов пыли, но при этом только 8% из них имеют антропогенное происхождение, в основном из Сахеля. В других регионах процент антропогенных выбросов пыли значительно выше, но при этом оказывает незначительное влияние на мировой пылевой баланс.

Например, Австралия с 75% антропогенной пыли составляет всего 13% от глобальных антропогенных выбросов. Гидрологические источники пыли (например, эфемерные водные объекты) составляют 31% по всему миру, 15% из них являются естественны-

ми источниками пылеобразования, в то время как оставшиеся 85% являются результатом деятельности человека.

Это может быть связано с использованием водных ресурсов для пахотных земель, для городских нужд, а также для выпаса овец и крупного рогатого скота, следовательно активность этих источников может сильно изменяться при изменении климата. С другой стороны, природные источники пыли слабо связаны с временными (эфемерными) водными объектами, и тут важную роль играют палеозера как источники эоловой пыли.

В глобальном масштабе 20% выбросов приходится на поверхности, покрытые растительностью, в основном пустынными кустарниками, и на *сельскохозяйственные земли*, особенно в результате интенсивной обработки.

Поскольку антропогенные источники пыли связаны с землепользованием и эфемерными водными объектами, которые в свою очередь связаны с гидрологическим циклом, их выбросы подвержены воздействию климатических колебаний.

Улучшенные оценки выбросов пыли потребуют более точного картирования пороговых скоростей ветра, динамики растительности и состояния поверхности (влажность почвы и тип землепользования), особенно в регионах, подверженных ветровой эрозии. Кроме того, необходимо более подробно изучить мелко-масштабные конвективные процессы, производящие пыли (хауб – сильная пыльная буря), связанные со стремительным движением (до 60 км/ч) холодного атмосферного фронта, которые имеют место в муссонном климате.

## ХИМИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЕННОГО АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ

*Дисперсионные* аэрозоли образуются при диспергировании (измельчении, распылении) твердых и жидких тел и при переходе порошкообразных тел во взвешенное состояние под действием воздушных потоков, сотрясений и т. д. Пылями Н.А. Фукс называет дисперсионные аэрозоли с твердыми частицами независимо от их дисперсности. Существующее мнение, что пылями следует называть лишь грубодисперсные системы, неправильно: путем искусственной или имеющей место в атмосфере естественной се-

парации могут образовываться пыли с высокой степенью дисперсности.

По дисперсности пыли классифицированы на пять групп: 1) очень крупнодисперсная пыль, размеры более 140 мкм; 2) крупнодисперсная пыль (40–140 мкм); 3) среднедисперсная пыль (10–40 мкм); 4) мелкодисперсная пыль (1–10 мкм); 5) очень мелкодисперсная пыль (менее 1 мкм). Особую опасность для человека представляют мелкодисперсные пыли с размером частиц 0.5–10 мкм, поступающие в атмосферу с вентиляционными выбросами и легко проникающие в органы дыхания ([Петрянов-Соколов, 2007](#)). Поскольку почвенный аэрозоль является составной частью атмосферного аэрозоля, то в данном контексте придерживаются вышеуказанной классификации. Не стоит путать ее с классификацией элементарных почвенных частиц по Н.А. Качинскому, где под пылью подразумеваются частицы размером от 1 до 50 мкм. Под действием ветра в процессе дефляции в атмосферу поднимаются частицы и больших размеров, поэтому с точки зрения механического состава пылевой аэрозоль включает не только пыль, но и фракцию песка.

### **Форма и структура частиц**

К основным морфологическим свойствам аэрозольных частиц относят их форму, структуру и характерные размеры. Твердые первичные частицы могут иметь разнообразные формы. Выделяют три основных класса таких частиц: изометрические (для которых в первом приближении все три размера совпадают – сферические), пластинчатые (которые имеют два “длинных” размера и один “короткий”), волокнистые (протяженные в одном направлении и имеющие сравнительно небольшие размеры в двух других – призмы, нити, волокна) ([Береснев, Грязин, 2008](#)).

Соль морского происхождения представлена в атмосфере частицами с размером от 0.1 до 1 мкм, их форма зависит от влажности: при низкой влажности частицы имеют кубическую форму, повторяя форму основного компонента морского аэрозоля – хлорида натрия; однако хлорид натрия хорошо растворим в воде и при высокой влажности частицы приобретают сферическую форму (рис. 4) ([Kokhanovsky, 2008](#)). Форма частиц существенно влияет на взаимодействие света с частицами, поэтому сложно разрабо-

тать универсальную оптическую модель для солевых частиц. Как минимум требуется два класса моделей (для условий с низкой и высокой влажностью) ([Kokhanovsky, 2008](#)).

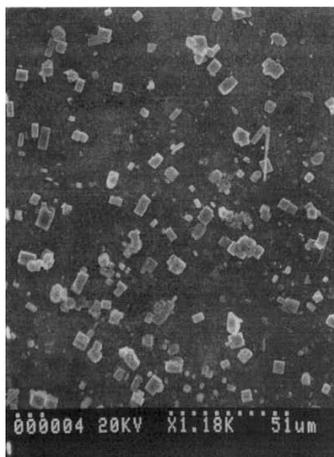
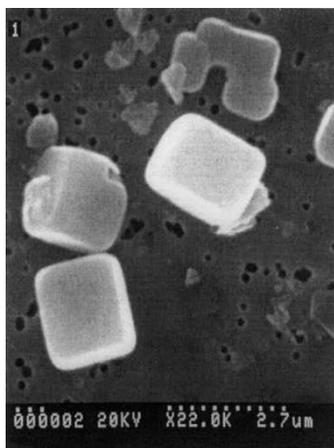
Пылеватые частицы, образованные на поверхности земли, в большинстве случаев нерастворимы в воде (например, состоящие из кремния). В отличие от морской соли форма этих частиц не зависит от влажности. Хотя в условиях избыточного увлажнения минеральные ядра могут быть покрыты водной пленкой или ледяной коркой, что может оказать влияние на оптические свойства частиц. Как правило, у влажных частиц показатели преломления будут ниже по сравнению с сухими ([Kokhanovsky, 2008](#)). Уникальность и разнообразие форм твердых частиц значительно осложняет моделирование оптических свойств пылевых аэрозолей (рис. 5, 6, 7).

### **Оптические свойства пылеватых частиц**

Оптические свойства – одни из самых типичных, но в тоже время важнейших характеристик аэродисперсных систем. Рассеивают излучение любые аэрозольные частицы. Некоторые частицы (например, сажевые) могут эффективно поглощать излучение. В запыленном воздухе затруднено проникание солнечного света: при  $0,1 \text{ мг/м}^3$  – до 10%, при  $1 \text{ мг/м}^3$  – до 55%.

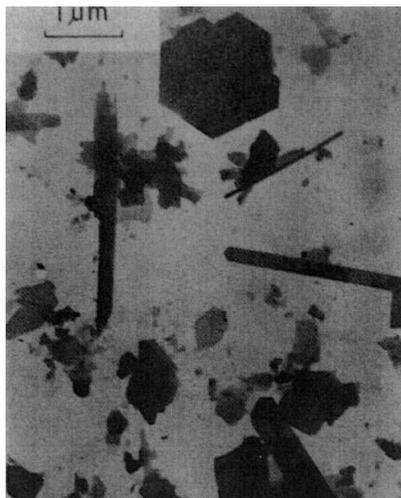
Некоторые зерна пыли могут иметь правильную форму ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)). Например, иллит обычно имеет округлую форму, голлоизит и апатит встречается в виде вытянутых трубчатых частиц, каолинит имеет шестиугольные очертания (шестисторонняя чешуйчатая форма), а кварц имеет остроугольную тетраэдроподобную или иногда прямоугольную форму. Авторы выделили несколько неправильных форм, называемых случайными зернами (рис. 8) и случайными пластинами (рис. 9), которые были использованы в анализе для учета угловатых частиц пыли с острыми краями, идентифицированными на изображениях SEM и TEM.

В работе Kalashnikova, Sokolik ([2004](#)) приводится характеристика почвенной пыли с точки зрения ее формы, размера и состава (composition–shape–size (CSS)).



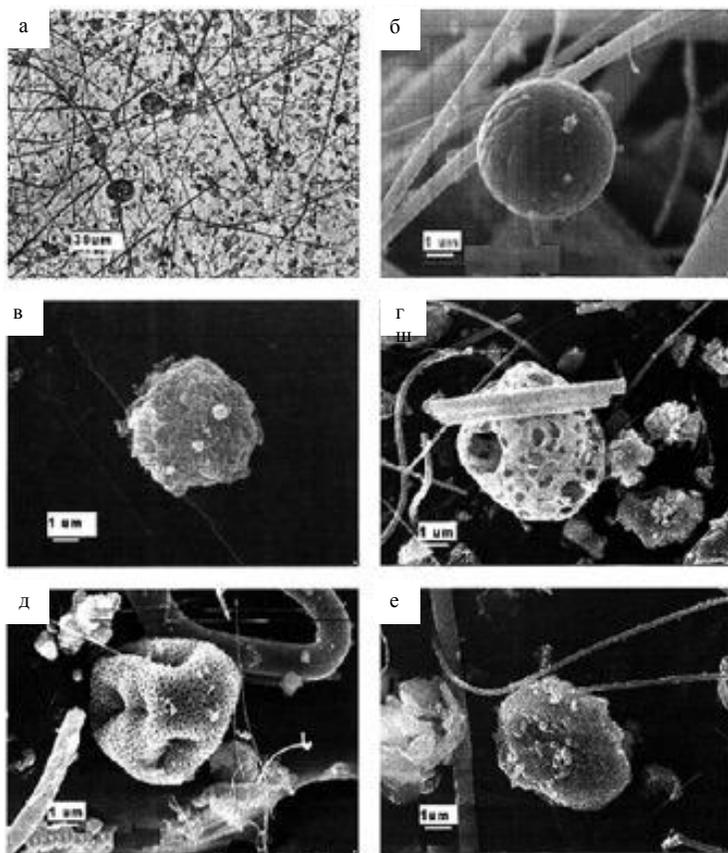
**Рис. 5.** Фотографии высушенных частиц морской соли, полученные с помощью электронного микроскопа, образцы отобраны на западном побережье Ирландии ([Kokhanovsky, 2008](#)).

**Fig. 5.** Scanning electron photographs of dried sea-salt particles for marine air conditions collected at Mace Head on the west coast of Ireland ([Kokhanovsky, 2008](#)).



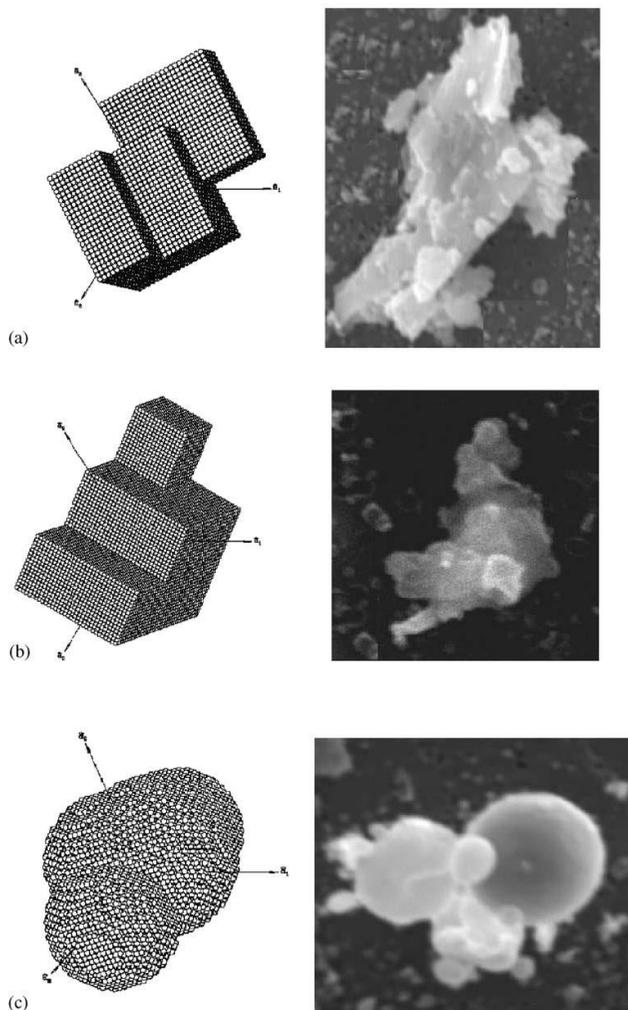
**Рис. 6.** Фотография правильных пылеватых частиц (СЭМ) ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)).

**Fig. 6.** Examples of regular model shapes identified from SEM images. ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)).



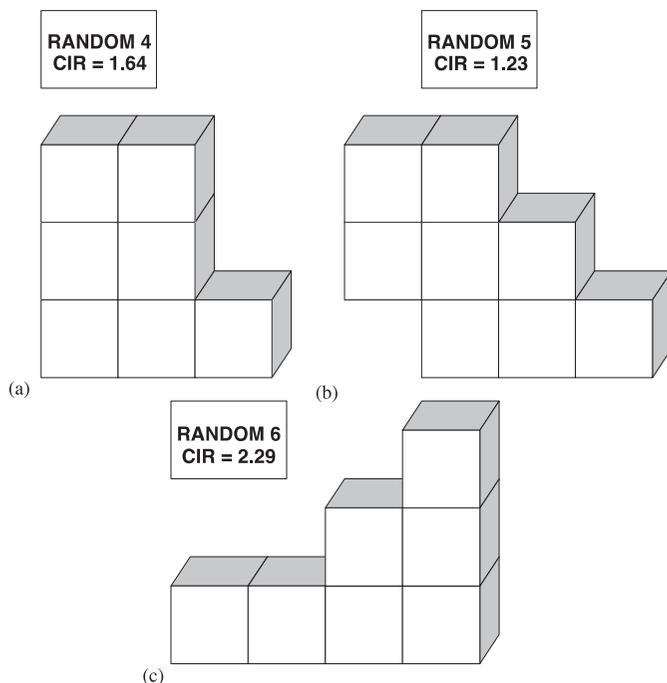
**Рис. 7.** Микрофотографии атмосферных частиц: **а)** частицы на фильтре РМ 10; **б)** углеродные частицы, образовавшиеся при горении; **в)** частица промышленных выбросов с высоким содержанием железа и меди; **г)** частица с большим содержанием ванадия; **д)** органическая частица; **е)** глинистая почвенная частица, содержащая алюминий, серу, железо и кальций ([Береснев, Грязин, 2008](#)).

**Fig. 7.** Microphotographs of atmospheric particles: **a)** particles on a PM 10 filter; **b)** carbon particles from combustion; **в)** particle of industrial emissions with high iron and copper content; **г)** particle with high vanadium content; **д)** organic particle; **е)** clay soil particle containing aluminium, sulphur, iron and calcium ([Beresnev, Gryazin, 2008](#)).



**Рис. 8.** Модели частиц неправильной формы, обнаруженных на изображении SEM, образцы почвенной пыли отобраны в Китае: (a) случайная 1; (b) случайная 2; (c) случайная 3 ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)).

**Fig. 8.** Random model shapes identified in SEM image of dust samples collected in China: (a) random 1; (b) random 2; (c) random 3 ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)).



**Рис. 9.** Модели произвольных форм с различной округлостью: (а) случайная 4, (б) случайная 5 и (с) случайная 6 ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)).

**Fig. 9.** Random model shapes with different circularities: (a) random 4, (b) random 5, and (c) random 6 ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)).

Исследовались два типа глинисто-гематитовых (или кварц-гематитовых) агрегатов: один с 10% гематита (сильное поглощение, тип 1) и другой с 1% гематита (слабое поглощение, тип 2). Агрегаты 1-го типа представлены образцами пыли из Сахары (сильно поглощающая красная пыль), а 2-ой тип представлен слабо поглощающей азиатской пылью (слабо поглощающая желтая пыль). Обобщив различные данные и используя процедуру реконструкции, авторы ввели несколько классов формы и состава, а также репрезентативные распределения CSS. Соотношение сторон (которое определяется как максимальная проекция/ширина, предполагая, что частицы проецируются своей наибольшей поверхно-

стью) составляет 1.5, что является репрезентативным значением для минеральной пыли ([Kalashnikova, Sokolik, 2004](#)), и, по данным Okada et al. ([2001](#)), оно не зависит от размера частиц.

Например, часто предполагается, что частицы имеют сферическую форму, а распределение частиц по размеру считается лог-нормальным, если эффективный радиус частицы  $a_{ef} = 10$  мкм, коэффициент вариации  $C = 1.5$ , геометрический радиус  $a_0 = 0.5$  мкм,  $\sigma = 1.1$ . Значение действительной части индекса преломления пыли близко к 1.5 в видимой части спектра (например, 1.53 при 550 нм) и снижается в ближнем ИК-диапазоне.

Предполагается, что значение  $\chi$  равно 0.008 как в видимом, так и в ближнем ИК-диапазонах. Необходимо учитывать, что данный показатель может существенно изменяться в зависимости от расположения источника пыли. Данные по индексу преломления и другие оптические константы для пылевого аэрозоля представлены в монографии А.А. Kokhanovsky ([2008](#)), а также в работах И.Н. Соколик ([Андропова, Соколик, 1992](#) и др.):

<http://irina.eas.gatech.edu/Data/data-ref-dust.htm>,

и

<http://www.astro.spbu.ru/staff/ilin2/ilin.html>.

В результате расчеты показали, что:

- Угловатые частицы, частицы с острыми краями характеризуются наибольшими различиями в оптических свойствах по сравнению со сферами и сфероидами.

- Увеличение количества остроугольных частиц в пылевой смеси увеличивает значение альбедо однократного рассеяния для данного состава. Влияние несферичности на однократное рассеяния сильнее выражено для сильно поглощающего материала.

- При одинаковом уровне запыленности частицы с острыми краями дают большую оптическую глубину, чем сферические частицы.

- Наличие тонких пылеватых частиц приводит к многообразным различиям в фазовой функции рассеяния по сравнению со сферами и сфероидами.

- Поскольку частицы с острыми краями часто являются основной частью пылевых смесей, влияние несферичности не нельзя игнорировать при моделировании радиации/климата и дистанционном зондировании.

Существует большой разрыв между оптическими измерениями и измерениями фундаментальных свойств пыли (например, состава, формы и распределения частиц по размерам), что существенно осложняет верификацию моделей с помощью результатов текущих наблюдений.

### **Химический состав пылеватых частиц**

По химическому составу сильно различаются аэрозоли морские, континентальные, городские и стратосферные. Понятие морские аэрозоли в смысле химического состава имеет смысл при отсутствии вблизи мощных источников аэрозолей с другим химическим составом и лишь для нижних слоев атмосферы, так как для высот больше 5 км зависимость химического состава аэрозолей от местных источников очень мала. Хотя основной компонентой морских аэрозолей являются хлориды, содержание сульфатов и органики может быть также весьма существенным. Химический состав частиц морского аэрозоля примерно соответствует химическому составу сухого остатка морской воды: NaCl – 78%, MgCl<sub>2</sub> – 11%, CaSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 11%, а также ряд органических соединений ([Трифонов, Девисилов, 2007](#); [Ивлев, Довгалюк, 1999](#)).

Наиболее хорошо изучен химический состав минеральной составляющей атмосферных аэрозолей над континентами (массовые %): SiO<sub>2</sub> – 40–50%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 15%; Fe – 5.4–6.0%; CaO – 2.4–0.9%; Na<sub>2</sub>O – 2–1.5%; K<sub>2</sub>O – 1.9–1.1%; MgO – 1.5–1.2%; TiO – 1.0–0.2%; MnO – 0.08–0.05%. Кроме этих компонентов наблюдается относительно большое содержание Cu, Ba, Ni, Sc, Cr, Zn ([Ивлев, Довгалюк, 1999](#)).

Особенности поведения аэрозолей разной химической природы ответственны за различия в химическом составе аэрозолей в атмосфере на разных высотах. Вертикальная структура химического состава аэрозолей в тропосфере характеризуется, как правило, слабым убыванием массовой концентрации большинства элементов, входящих в состав неорганических аэрозолей. Для отдельных элементов, как, например, Fe, это убывание может отсутствовать. Наиболее сильно уменьшается с высотой концентрация SiO<sub>2</sub>, что, по-видимому, связано с относительно большими размерами частиц, содержащих кремний.

Минеральная пыль поступает в атмосферу с поверхности Земли в результате различных процессов, в основном сальтационно-пескоструйного и агрегатного дробления. Поэтому в целом она может состоять из любого минерала (т. е. из 1 000 и более). Однако многие из них встречаются редко или приурочены к определенным географическим районам со специфической геологией. Более того, состав осадка и состав пыли не идентичны, поскольку в процессе выброса происходит фракционирование. В результате в атмосферной пыли обычно обнаруживается гораздо меньшее количество минеральных групп – около 20 ([Kandler, Scheuvens, 2019](#)). *Однако их химический состав не идентичен полностью химическому составу почв ввиду того, что не все минералы и другие почвенные продукты одинаково диспергируются.* Почвенная пыль очень обогащена окислами железа и марганца по сравнению с почвообразующей породой – ее источником. *Вероятно, при образовании мелкой пыли процессы физического и химического разделения действуют селективно, но это фракционирование пока не изучено.* Примерно одинаковый состав пыли обнаружен над разными местами с открытой земной поверхностью (в горах, пустынях, полупустынях, степях, над пахотой). В основном для аэрозолей почвенного происхождения характерно присутствие кварца и других соединений кремния, глиноземов, карбонатов и кальцитов, окислов железа. В относительно больших количествах в аэрозолях могут наблюдаться также соединения магния, натрия и калия.

Различные минералы и минеральные группы релевантны различным атмосферным процессам, поэтому имеет смысл классифицировать пыль соответствующим образом ([Kandler, Scheuvens, 2019](#)):

**1. Глинистые минералы:** глинистые минералы обычно составляют большую часть массы и количества атмосферной пыли. Поэтому они являются одними из наиболее важных для оптических аспектов, таких как рассеяние коротковолнового излучения, поглощение и излучение длинных волн, но менее важны для поглощения коротких волн из-за их низкой мнимой части показателя преломления. Наиболее распространенными глинистыми минера-

лами/группами минералов в составе атмосферной пыли являются каолинит, иллит, хлорит, смектиты и слюды.

**2. Оксиды железа и окси-гидроксиды:** они наиболее важны для поглощения света, поскольку их мнимая часть показателя преломления на порядок выше, чем у глинистых минералов. Они могут существовать в виде отдельных зерен, а также смешиваться с агрегатами глинистых минералов. По массе они чаще всего являются незначительными или следовыми соединениями пыли. Наиболее распространенными минеральными видами для природных источников являются гематит и гетит.

**3. Карбонаты:** они являются наиболее реактивными частицами среди пыли и могут легко взаимодействовать с кислотами, такими как серная или азотная. Таким образом они могут сильно повышать свою гигроскопичность. Вклад карбонатов сильно варьирует и главным образом зависит от источника пыли. Наиболее распространенными карбонатами являются кальцит и доломит.

**4. Полевые шпаты:** полевые шпаты недавно оказались в центре внимания, так как некоторые минералы класса полевых шпатов являются эффективными ядрами льда и поэтому могут влиять на облачные процессы. Полевые шпаты обычно составляют незначительную долю от общего количества пыли. Наиболее распространенными минералами в этой группе являются альбит, ортоклаз, микроклин и изменчивые плагиоклазы.

**5. Каталитические вещества:** некоторые соединения в пыли могут выступать в качестве катализаторов в химических или фотохимических процессах, в основном это оксиды железа и титана. Как и оксиды железа, оксиды титана обычно присутствуют лишь в следовых количествах. Наиболее распространенными минералами титана являются рутил/анатаз (обычно не различаются) и ильменит. Оксиды титана заслуживают внимания, поскольку они участвуют в фотокаталитических гетерогенных реакциях с различными компонентами атмосферы, включая летучие и полуметучие органические соединения, которые обнаруживаются в районах переноса минеральной пыли в результате выбросов при сжигании биомассы (Gustafsson et al., 2006; [Formenti et al., 2014](#)).

**6. Питательные вещества:** для морских экосистем обычно интерес представляют соединения железа и фосфора, тогда как

для наземных – фосфор, кальций и магний. Какое соединение может выступать в качестве эффективного питательного вещества, зависит от состояния экосистемы. Обычными фосфатными соединениями являются апатиты, магний может присутствовать в доломите или в различных глинистых минералах.

**7. Другие вещества**, такие как непосредственно токсичные или абразивные материалы: наиболее абразивным и все еще основным или незначительным соединением пыли является кварц. Однако из-за большого размера частиц он обычно не переносится далеко в этом потенциально абразивном диапазоне размеров. Другими веществами, о токсичности которых сообщалось, являются, например, соединения меди. Аспекты здоровья человека часто связаны с кварцем и асбестом по разным причинам, но также сообщается о таких токсичных веществах в природной пыли, как хром и другие тяжелые металлы.

Разные механические фракции ( $>0.001$  и  $<0.001$  мм) минеральной части почвообразующих пород и почв различаются между собой по минералогическому и химическому составу. В песке и крупной пыли преобладают кварц и полевые шпаты. В более мелких фракциях (средней и мелкой пыли) количество этих минералов уменьшается, а содержание слюд и роговых обманок увеличивается. Мелкодисперсная ( $<0.001$  мм) илистая и коллоидная фракции состоят главным образом из вторичных (глинистых) минералов. Поскольку глинистые минералы имеют меньшие размеры, они легче поднимаются воздушными потоками и дольше пребывают в атмосфере, следовательно, поэтому почвенный аэрозоль преимущественно состоит из глинистых минералов.

Kandler и Scheuvens (2019) обобщили данные по химическому и минералогическому составу как в объеме, так и на уровне отдельных частиц, полученные в результате собственных исследований и из различных литературных источников.

Анализ методом рентгенографии показал, что в минералогическом составе пыли обычно преобладают силикаты, карбонаты и оксиды железа и титана. Наиболее важными силикатными фазами являются кварц, полевой шпат (плагиоклаз, К-полевой шпат) и различные филлосиликаты (слюда, хлорит, глинистые минералы). Другие силикаты (например, амфиболы, пироксены, палыгорскит)

встречаются лишь в незначительных или следовых количествах. Кварц является основной минералогической фазой атмосферной пыли и обычно составляет от 10 до 60% масс. минералогического состава. Минералы полевого шпата являются лишь незначительным компонентом и редко превышают 10% масс. Для того, чтобы связать образцы минеральной пыли (даже после транспортировки на большие расстояния) с потенциальным районом ее происхождения наиболее целесообразно использовать встречаемость и обилие хлорита, представителей группы иллита, каолина и смектита, а также палыгорскита. Последний представляет собой редко наблюдаемый магнево-алюминиевый филлосиликат, который характерен для районов-источников в северной (западной) части Африки и пыли, перенесенной в Средиземноморский регион и на Канарские острова ([Kandler, Scheuvens, 2019](#)).

Дополнительные минералы, обнаруженные с помощью рентгеновской дифракции в образцах минеральной пыли, включают (гидр)оксиды Fe в виде магнетита, гематита или гетита, а также солевые минералы в виде гипса или галита. Гетит в целом является доминирующим видом оксидов железа. На гетит приходится от 48 до 73% массы оксида железа, тогда как на гематит – от 27 до 52% ([Formenti et al., 2014](#)).

Доля органических веществ в аэрозолях почвенного происхождения невелика, не более 10% ([Ивлев, Довгалюк, 1999](#)).

Леппл и Брайн (1976) оценили, что содержание органики в минеральной пыли составляет порядка 3%. Исследования Formenti et al. ([2003](#)) не выявили измеримого органического углерода. Пылевые аэрозоли способны поглощать газы и взаимодействовать с ними. Таким образом, минеральная пыль может играть значительную, но в основном неизвестную роль в образовании вторичного органического аэрозоля в атмосфере.

Falkovich et al. ([2004](#)) исследовали перенос органических веществ почвенной пылью, в основном речь идет об эфирах, газах и водорастворимых веществах (низкомолекулярные карбоновые кислоты, ацетаты, фталаты и др.), которые адсорбируются на поверхности минеральных частиц из атмосферного аэрозоля, а также о пестицидах.

Помимо низкомолекулярных соединений органический аэрозоль включает высокомолекулярные гуминоподобные вещества (HULIS – Humic-Like Substances), которые образуют на поверхности минеральных частиц пленки, тем самым увеличивая их гидрофильность и способность поглощать воду, в результате чего минеральные частицы выступают в качестве ядер нуклеации облаков ([Hatch et al., 2008](#)). В качестве доминирующего источника HULIS выделяются вторичные процессы (38.9%) и сжигание угля и биотоплива (47.1% и 15.1% соответственно), на долю почвенной и дорожной пыли приходится не более 5% ([Zheng et al., 2013](#); [Li et al., 2019](#)).

Причины малого содержания почвенного органического вещества в пылевом аэрозоле не изучены, на данный момент можно лишь выдвинуть несколько предположений.

Как отмечалось выше, почвенные вещества диспергируются по-разному. Наибольшей степенью дисперсности характеризуются в первую очередь глинистые минералы, которые составляют основную массу почвенного аэрозоля. А гуминовые кислоты, например, наоборот, отличаются низкой полидисперсностью ([Мамонтов и др., 2020](#)). В связи с чем можно предположить, что само по себе органическое вещество слабо подвержено диспергации и попаданию в атмосферу. Кроме того, некоторые авторы приходят к выводу, что применение органических удобрений предотвращает переход ила в более лабильное состояние, разрушение смектитовой фазы (Скрябина, 2010). Агрегаты почвы являются вторичными структурными единицами, образованными комбинацией минеральных частиц с органическими и/или неорганическими связующими веществами. Компоненты органического вещества почвы физически и химически связывают первичные минеральные частицы в агрегаты, что в свою очередь повышает стабильность агрегатов и ограничивает их разрушение ([Когут и др., 2019](#)). Длительное применение минеральных удобрений и бесшумное парование приводят к уменьшению прочности связи между минеральными компонентами микронной размерности, разрушению слюда-смектитового образования с высоким содержанием смектитовых пакетов, активации процессов механической дезинтеграции кластогенных минералов. Наибольшая доля вклада

органического вещества в общее ОВ почвы (чернозема) приходится на агрегаты диаметром 2–1 мм ([Когут и др., 2019](#); [2012](#)), содержание ОВ в агрегатах меньшего размера ниже, а в исследованиях преимущественно приводятся данные по распределению частиц почвенной пыли размером до 20 мкм.

Около 40 % аэрозолей в тропосфере (самый низкий слой земной атмосферы) составляют частицы пыли от ветровой эрозии. Основными источниками этой минеральной пыли являются засушливые регионы Северной Африки, Аравийского полуострова, Центральной Азии и Китая. На Австралию, Америку и Южную Африку приходится сравнительно незначительный (<https://public.wmo.int/ru/>). Основные источники пыли сконцентрированы в северном полушарии в аридных зонах, где почвы характеризуются низким уровнем плодородия, поэтому почвенный аэрозоль состоит в основном из минеральных веществ ([Prospero et al., 2002](#); [Ginoux et al., 2012](#)). Сильные ветры переводят во взвешенное состояние минералы, отложенные в результате процессов смыва и последующей аккумуляции. Разрушительному действию ветра подвергаются обесструктуренные, рыхлые и пересушенные почвенные слои с низким содержанием органического вещества. Отсюда можно заключить, что органическое вещество поступает из почвы в атмосферу в виде органо-минеральных комплексов и в очень малых количествах ввиду его небольшого содержания в исходном материале.

Еще одной причиной низкого содержания органического вещества в почвенном аэрозоле может служить коррозия, т. е. процесс механической эрозии, обтачивания, истирания, шлифования почвенных частиц друг о друга при скачкообразном перемещении. Частицы, переносимые ветром, действуют в качестве природного “абразивного инструмента”, в процессе такого обтачивания происходит также образование нового обломочного материала, вовлекаемого в процесс дефляции. Таким образом, процессы коррозии и дефляции взаимосвязаны и протекают одновременно. Вероятно, пленки из органического вещества, покрывающие минеральные частицы, стираются в результате механического абразивного воздействия частиц при движении. Минеральная часть почвы имеет огромную суммарную поверхность, на которой про-

текают многие адсорбционные процессы. Взаимодействие гумусовых кислот или гуматов с обменными катионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{+}$  глинистых минералов носит обменный характер. Образующийся вновь гумат не связан с кристаллической решеткой минералов, а лишь выпадает в осадок на ее поверхности (Ковда, Розанов, 1988).

Глинисто-гумусовые комплексы образуются не через главные валентности, а в процессе склеивания (адгезии) поверхностей при дегидратации компонентов. Процесс склеивания осуществляется за счет межмолекулярных сил. В таком случае закрепление гумуса пропорционально поверхности минеральных частиц. Вопрос о проникновении гумусовых кислот в межслоевое пространство глинистых минералов остается дискуссионным: Л.Н. Александрова отрицает такую возможность, Д.С. Орлов указывает на возможность проникновения фульвокислот в межплоскостное пространство монтмориллонита в условиях резко кислой реакции (рН 2.5). При взаимодействии с минеральной частью наиболее активно поглощаются низкомолекулярные фракции, т. е. происходит их фракционирование ([Ковда, Розанов, 1988](#)).

Еще одной причиной низкого содержания органического почвенного вещества в атмосферной пыли является то, что под воздействием атмосферных осадков и/или ирригации на поверхности пахотного горизонта почв часто образуется почвенная корка, которая состоит из тонких почвенных частиц и обеднена органическим веществом по отношению с его содержанием в пахотном горизонте ([Prudnikova, et al., 2021](#)), но которая и является основным источником пыли в атмосфере из пахотных почв.

Таким образом, минеральная пыль в атмосфере содержит очень малое количество ОВ, однако вступает в химические реакции, действует как катализатор и обеспечивает поверхность для гетерогенных реакций. Например, карбонатные соединения в пыли могут значительно снизить кислотность атмосферы, вступая в реакцию с азотной и серной кислотой. Соединения оксидов металлов в сочетании с фотохимическими процессами могут привести к каталитическому разложению озона и модифицировать циклы NO. На поверхности пыли могут происходить разнообразные органические и неорганические реакции, а на эффективность реакции, по-видимому, влияет состав пыли ([Kandler, Scheuvens, 2019](#)).

Однако почвы могут не только быть источником пыли, но и аккумулировать аэрозоли других типов. Например, соляные бури являются причиной подъема и переноса солей высохших территорий, занимаемых ранее морем, которые впоследствии оседают на поверхности почв. Снакин В.В. с соавторами (2000) описывают перенос солей высыхающего Аральского моря в сельскохозяйственные районы Средней Азии и низовий Волги.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с многообразным воздействием почвенной пыли на различные сферы жизни людей отмечается повышенный интерес к координации наблюдений и усилий по исследованию пыли на международном уровне. Данные, получаемые в режиме реального времени с помощью моделирования, могут внести значительный вклад в снижение рисков различных воздействий. По этой причине основной целью в настоящий момент является совершенствование моделей образования, переноса, физико-химической эволюции и удаления минеральных аэрозолей в различных пространственных и временных масштабах путем оценки/валидации и ассимиляции результатов наблюдений.

Пылевой аэрозоль, являясь одним из основных компонентов тропосферных атмосферных аэрозолей, существенно влияет на радиационный баланс и способствует изменению климата. Минеральная почвенная пыль, несомненно, является одним из наиболее важных видов аэрозолей в системе Земли. Когда пыль взаимодействует с облаками, океанами и солнечным излучением, она оказывает воздействие на живые системы нашей планеты, оказывая влияние на все – от погоды и осадков до глобального потепления.

Основным источником пыли является поверхность почв, особенно при интенсивной обработке, и пустынь, такая пыль вносит основной вклад в глобальную нагрузку (50–75%), доминирует в климатических эффектах на значительных территориях мира. По данным последних исследований, значительная часть средней и крупной пыли (более 5–10 мкм, особенно более 20 мкм) слабо изучена, ее нагрузка и вклад в глобальные процессы недооценены, преимущественно исследования по почвенной пыли представлены для частиц размером до 5–10 мкм.

Поскольку пыль изучается как с точки зрения аэрозоля, так и отдельных частиц, то невозможно выделить какой-то один универсальный метод исследования. Наиболее точные оценки концентрации пыли в атмосфере и ее переноса дают комплексные подходы, включающие лидарное зондирование, спутниковый мониторинг, сеть наземных измерений; попытки моделирования предпринимаются регулярно, поскольку это единственный способ оценить вклад пыли в глобальном масштабе, однако модельные расчеты дают очень приближенные значения и требуют верификации с помощью измерений “in situ”, так же, как и другие дистанционные методы. Приведенные выше исследования подтверждают, что лидарно-фотометрический метод может точно определять вертикальные профили атмосферного столба, идентифицировать некоторые типы частиц (например, кремнийсодержащие), их оптические и микрофизические свойства, а также массовую концентрацию пыли. Для изучения свойств отдельных частиц обширно используются различные виды микроскопии, позволяющие получать 2-D модели, а в случае дорогостоящих исследований на атомно-силовом микроскопе – 3-D модели частиц. Это особенно важно для изучения формы и размеров частиц, определяющих оптические свойства пыли, потому что частицы минеральной пыли характеризуются огромным многообразием неправильных форм и широким диапазоном размеров. В результате теория Ми, применяемая для частиц сферической формы, имеет массу ограничений в случае с минеральной пылью, в том числе и почвенного происхождения.

Свойства почвенной пыли, включая оптические, во многом зависят от ее микрофизических и композиционных свойств. Пыль изменяет глобальный энергетический баланс своим прямым радиационным воздействием. В отношении солнечного воздействия, в частности, оксиды железа играют доминирующую роль в поглощении излучения. Минералогия пыли оказывает значительное влияние на баланс теплового излучения. Пыль изменяет облачные циклы макроскопически, изменяя условия стабильности атмосферы, и микроскопически, изменяя процессы конденсации облаков и зарождения льда, тем самым влияя на глобальный круговорот во-

ды и косвенно на климат. Очевидно, что последний эффект также зависит от состава пыли и состояния смешивания.

Кроме того, необходимо понимать, что благодаря своей дисперсности и большой площади поверхности пыль вступает в реакции с другими видами аэрозолей, что приводит к образованию различных пленок на поверхности частиц или к внутреннему смешению, и, следовательно, изменяет оптические свойства минеральной почвенной пыли. Также пыль может служить вектором для переноса различных биологических компонентов (вирусов и бактерий из-за их малых размеров) и питательных веществ, городских загрязняющих веществ. Все эти факторы, с одной стороны, осложняют изучение пылевого аэрозоля, а с другой – позволяют идентифицировать место ее происхождения и источник, как, например, в случае с пылью из Африки и Азии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллаев С.Ф.* Комплексные исследования пылевых и газовых примесей в аридных зонах и их влияние на региональный климатический режим юго-восточной части Центральной Азии: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. 25.00.30. СПб, 2014. 315 с.
2. *Андропова А.В., Соколик И.Н.* Оптические постоянные пылевого аэрозоля // в сб. Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. С. 95–103.
3. *Береснев С.А., Грязин В.И.* Физика атмосферных аэрозолей: Курс лекций. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. 227 с.
4. *Бретшнайдер Б., Курфюрст И.* Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль. Л.: Химия, 1989. 288 с.
5. *Вальдберг А.Ю.* Пыль и дым // Химия и жизнь. 1989. № 4. С. 71–76.
6. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1972. 428 с.
7. *Егоров В.Н., Хабаров Д.А.* Определение запыленности воздуха (Методические указания). М.: 2016.
8. *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 365 с.
9. *Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
10. *Исидоров В.А.* Экологическая химия. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.
11. *Ковда В.А., Розанов Б.Г.* Почвоведение. Часть 1. Почва и почвообразование. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.

12. *Козут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.
13. *Козут Б.М., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И.* Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170.
14. *Кононова Е.С., Пронин С.П.* Обзор современных технических средств измерения и контроля взвешенных частиц в атмосферном воздухе // Ползуновский Альманах. 2017. Т. 3. № 4. С. 77–80.
15. Краткая географическая энциклопедия. Том 3 / Гл. ред. *Григорьев А.А.* М.: Советская энциклопедия, 1962. 580 с.
16. *Мамаева Н.Ю.* Инструкция по определению запыленности воздуха // Лабораторные методики и технологические инструкции в консервации документов. 2016. С. 28–38.
17. *Мамонтов В.Г.* Почвоведение: справочник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. 365 с.
18. *Пронин С.П., Кононова Е.С., Кальной Д.Г.* Методическое и техническое обеспечение локальной системы экологического мониторинга атмосферы // Ползуновский Вестник. 2010. № 2. С. 188–192.
19. *Новиков В.Т.* Оборудование и основы проектирования систем охраны окружающей среды. Часть 1. Пыль, ее свойства и пылеулавливание. Томск: Изд. ТПУ, 2003. 176 с.
20. *Петрянов-Соколов И.В.* Избранные труды. Законы фильтрации аэрозолей. М.: Наука, 2007. 458 с.
21. *Пирумов А.И.* Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.
22. *Романовская А.Ю., Савин И.Ю.* Современные методы мониторинга ветровой эрозии почв // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020 Вып. 104. С. 110–157. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-110-157](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-110-157).
23. *Рудяк В.Я.* Статистическая механика гетерогенных сред. IV. Принципы классификации. Новосибирск, 1995. 19 с. (Препринт/Новосиб. гос. академия строительства; № 3(8)).
24. *Трифонов К.И., Девисилов В.А.* Физико-химические процессы в техносфере. Москва: ФОРУМ, 2007. 240 с.
25. *Фелленберг Г.* Загрязнение природной среды. Введение в экологическую химию. М.: Мир, 1997. 232 с.
26. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во Мир, 1955. 369 с.
27. *Adebisi A.A., Kok J.F.* Climate models miss most of the coarse dust in the atmosphere // Science Advances. 2020. Vol. 6 (15). eaaz9507. DOI:

[10.1126/sciadv.aaz9507](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9507).

28. *Andreae M.O.* Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels / In A. Henderson-Sellers (Ed.) *Future Climates of the World: A Modelling Perspective*. World Survey of Climatology. New York: Elsevier, 1995. Vol. 16. P. 347–398.

29. *Ansmann A., Müller D.* Lidar and Atmospheric Aerosol Particles / In: Weitkamp C. (Ed.) *Lidar*, Springer Series in Optical Sciences. 2005. Vol. 102. Springer. DOI: [10.1007/0-387-25101-4\\_4](https://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_4).

30. *Ansmann A., Tesche M., Seifert P., Gross S., Freudenthaler V., Apituley A., Wilson K.M., Serikov I., Linne H., Heinold B. et al.* Ash and fine-mode particle mass profiles from EARLINET-AERONET observations over central Europe after the eruptions of the Eyjafjallajökull volcano in 2010 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2011. Vol. 116. D00U02. DOI: [10.1029/2010JD015567](https://doi.org/10.1029/2010JD015567).

31. *Attiya A.A., Jones B.G.* Assessment of mineralogical and chemical properties of airborne dust in Iraq // *SN Appl. Sci.* 2020. Vol. 2. 1614. DOI: [10.1007/s42452-020-03326-5](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03326-5).

32. *Baensch-Baltruschat B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G.* Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 733. 1378237. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137823](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823).

33. *Bauer E., Ganopolski A.* Sensitivity simulations with direct radiative forcing by aeolian dust during glacial cycles // *Climate of the Past*. 2014. Vol. 10 (4). P. 149–193. DOI: [10.5194/cp-10-1333-2014](https://doi.org/10.5194/cp-10-1333-2014).

34. *d'Almeida G.A. et al.* *Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics*. New York: A. Deepak, 1991.

35. *Cadle R.D.* *Particles in the Atmosphere and Space*. New York: Reinhold, 1966. 226 p.

36. *Choi J.C., Lee M., Chun Y., Kim J., Oh S.* Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul, Korea // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 18067–71.

37. *Falkovich A.H., Schkolnik G., Ganor E., Rudich Y.* Adsorption of organic compounds pertinent to urban environments onto mineral dust particles // *Journal of geophysical research. Atmospheres*. 2004. Vol. 109. Iss. D2. DOI: [10.1029/2003JD003919](https://doi.org/10.1029/2003JD003919).

38. *Freedman F.R., English P., Wagner J., Liu Y., Venkatram A., Tong D.Q., Al-Hamdan M.Z., Sorek-Hamer M., Chatfield R., Rivera A., Kinney P.L.* Spatial Particulate Fields during High Winds in the Imperial Valley // *California. Atmosphere*. 2020. Vol. 11. 88. DOI: [10.3390/atmos11010088](https://doi.org/10.3390/atmos11010088).

39. *Formenti P., Schütz L., Balkanski Y., Desboeufs K., Ebert M. et al.* Recent progress in understanding physical and chemical properties of African and

- Asian mineral dust // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 11 (16). P. 8231–8256. DOI: [10.5194/acp-11-8231-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-8231-2011).
40. *Formenti P., Caquineau S., Desboeufs K., Klaver A., Chevaillier S., Journet E., Rajot J.L.* Mapping the physico-chemical properties of mineral dust in western Africa: mineralogical composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. Vol. 14. P. 10663–10686. DOI: [10.5194/acp-14-10663-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-10663-2014).
41. *Ginoux P., Prospero J., Gill T., Hsu N., Zhao M.* Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // *Rev. Geophys.* 2012. Vol. 50. RG3005. DOI: [10.1029/2012RG000388](https://doi.org/10.1029/2012RG000388).
42. *Goel V., Mishr S.K., Pal P., Ahlawat A., Vijayan N., Jain S., Sharma Ch.* Influence of chemical aging on physico-chemical properties of mineral dust particles: A case study of 2016 dust storms over Delhi // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 267. 115338. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115338](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115338).
43. *Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C.* Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements // *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46 (12). P. 6523–6529. DOI: [10.1021/es300894r](https://doi.org/10.1021/es300894r).
44. *Hatch C., Gierlus K., Schuttlefield Christus J., Grassian V.* Water adsorption and cloud condensation nuclei activity of calcite and calcite coated with model humic and fulvic acids // *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. P. 5672–5684. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.03.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.005).
45. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC // *Bull. Am. Met. Soc.* 1998. Vol. 79. Iss. 5. P. 831–844.
46. *Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A.* *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
47. *Huneus N. et al.* Global dust model intercomparison in AeroCom phase I // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. Vol. 11. P. 7781–7816.
48. *Huang J., Liu J., Chen B., Nasiri S.* Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. P. 11653–11665. DOI: [10.1126/science.1106335](https://doi.org/10.1126/science.1106335).
49. *Ibrahim S., Romanias M.N., Alleman L.Y., Zeineddine M.N., Angeli G.K., Trikalitis P.N., Thevenet F.* Water Interaction with Mineral Dust Aerosol: Particle Size and Hygroscopic Properties of Dust // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2018. Vol. 2 (4). P. 376–386. DOI: [10.1021/acsearthspacechem.7b00152](https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.7b00152).
50. *Jaenicke R.* Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere // *Science*. 2005. Vol. 308. 73. DOI: [10.1126/science.1106335](https://doi.org/10.1126/science.1106335).

51. *Jin S., Ma Y., Zhang M., Gong W., Dubovik O., Liu B., Shi Y., Yang C.* Retrieval of 500 m Aerosol Optical Depths from MODIS Measurements over Urban Surfaces under Heavy Aerosol Loading Conditions in Winter // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 2218. DOI: [10.3390/rs11192218](https://doi.org/10.3390/rs11192218).
52. *Kalashnikova O.V., Sokolik I.N.* Modeling the radiative properties of nonspherical soil-derived mineral aerosols // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.* 2004. Vol. 87. P. 137–166. DOI: [10.1016/j.jqsrt.2003.12.026](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2003.12.026).
53. *Kandler K., Scheuevens D.* Asian and Saharan dust from a chemical/mineralogical point of view: differences and similarities from bulk and single particle measurements // *Central Asian Dust Conference (CADUC).* 2019. Vol. 99. 03001. DOI: [10.1051/e3sconf/20199903001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199903001).
54. *Katra I.* Soil Erosion by Wind and Dust Emission in Semi-Arid Soils Due to Agricultural Activities // *Agronomy.* 2020. Vol. 10. 89, DOI: [10.3390/agronomy10010089](https://doi.org/10.3390/agronomy10010089).
55. *Kaufman Y.J., Koren I., Remer L.A., Tanre D., Ginoux P., Fan S.* Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2005. Vol. 110. D10S12. DOI: [10.1029/2003JD004436](https://doi.org/10.1029/2003JD004436).
56. *Kok J.F., Ridley D.A., Zhou Q., Miller R.L., Zhao C., Heald C.L., Ward D.S., Albani S., Haustein K.* Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance // *Nature Geoscience.* 2017. Vol. 10 (4). P. 274–278. DOI: [10.1038/ngeo2912](https://doi.org/10.1038/ngeo2912).
57. *Kokhanovsky A.A.* *Aerosol Optics. Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere.* Springer, 2008. 146 p.
58. *Kokhanovsky A.A., Leeuw G.* *Satellite Aerosol Remote Sensing Over Land.* Springer, 2009. 388 p.
59. *Lafon S., Rafot J.L., Alfaro S.C., Gomes L., Maill M., Gaudichet A.* Iron status in mineral desert aerosols / In: *IAMAS Congress. No. 2 in 5.* AMS. 2001.
60. *Li X., Yang K., Han J., Ying Q., Hopke P.K.* Sources of humic-like substances (HULIS) in PM<sub>2.5</sub> in Beijing: Receptor modeling approach // *Sci Total Environ.* 2019. Vol. 671. P. 765–775. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.03.333](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.333).
61. *Mahowald N.M., Rivera G.D.R., Luo C.* Comment on “Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission” by I. Tegen et al. // *Geophysical Research Letters.* 2004. Vol. 31. DOI: [10.1029/2004GL021272](https://doi.org/10.1029/2004GL021272).
62. *Mamouri R.E., Ansmann A.* Potential of polarization / Raman lidar to separate fine dust, coarse dust, maritime, and anthropogenic aerosol profiles //

Atmos. Meas. Tech. 2017. Vol. 10. P. 3403–3427. DOI: [10.5194/amt-10-3403-2017](https://doi.org/10.5194/amt-10-3403-2017).

63. *Maring H., Savoie D.L., Izaguirre M.A., Custals L.* Mineral dust aerosol size distribution change during atmospheric transport // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2003. Vol. 108 (19). DOI: [10.1029/2002JD002536](https://doi.org/10.1029/2002JD002536).

64. *Miller R.L., Cakmur R.V., Perlwitz J., Geogdzhayev I.V., Ginoux P., Koch D., Kohfeld K.E., Prigent C., Ruedy R., Schmidt G.A., Tegen I.* Mineral dust aerosols in the NASA Goddard Institute for Space Sciences ModelE atmospheric general circulation model // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2006. Vol. 111. D06208. DOI: [10.1029/2005JD005796](https://doi.org/10.1029/2005JD005796).

65. *Minoz O., Volten H., de Haan J., Vassen W., Hovenier J.* Experimental determination of scattering matrices of randomly oriented fly ash at 442 and 633 nm // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 22833–45.

66. *Mona L., Liu Z., Müller D., Omar A., Papayannis A., Pappalardo G., Sugimoto N., Vaughan M.* Lidar Measurements for Desert Dust Characterization: An Overview // Advances in Meteorology. 2012. Article ID 356265. DOI: [10.1155/2012/356265](https://doi.org/10.1155/2012/356265).

67. *Muhs D.R., Prospero J.M., Baddock M.C., Gill T.E.* Identifying sources of aeolian mineral dust: Present and past / In: Mineral dust: A key player in the earth system. 2014. P. 51–74. DOI: [10.1007/978-94-017-8978-3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3).

68. *Nemuc A., Vasilescu J., Talianu C., Belegante L., Nicolae D.* Assessment of aerosol's mass concentrations from measured linear particle depolarization ratio (vertically resolved) and simulations // Atmos. Meas. Tech. 2013. Vol. 6. P. 3243–3255. DOI: [10.5194/amt-6-3243-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-3243-2013).

69. *Okada K., Heintzenberg J., Kai K., Qin Y.* Shape of atmospheric mineral particles collected in three Chinese arid-regions // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. 3123–3126. DOI: [10.1029/2000GL012798](https://doi.org/10.1029/2000GL012798).

70. *Prospero J.M., Ginoux P., Torres O., Nicholson S., Gill T.* Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust derived from the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product // Rev. Geophys. 2002. Vol. 40 (1). 1002. DOI: [10.1029/2000RG000095](https://doi.org/10.1029/2000RG000095).

71. *Prudnikova E.Y., Savin I.Y., Lebedeva M.P. et al.* Transformation of the Surface Layer in the Arable Soil Horizon under the Impact of Atmospheric Precipitation // Eurasian Soil Sc. 2021. Vol. 54. P. 1770–1781. DOI: [10.1134/S1064229321110119](https://doi.org/10.1134/S1064229321110119).

72. *Reid J.S. et al.* Comparison of size and morphological measurements of coarse mode dust particles from Africa // J. Geophys. Res. 2003. 108. 8593. DOI: [10.1029/2002JD002485](https://doi.org/10.1029/2002JD002485).

73. *Ryder C.L., Highwood E.J., Walser A., Seibert P., Philipp A., Weinzierl B.*

- Coarse and giant particles are ubiquitous in saharan dust export regions and are radiatively significant over the Sahara // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. P. 15353–15376. DOI: [10.5194/acp-19-15353-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-15353-2019).
74. *Sharratt B., Auvermann B.* Dust Pollution from Agriculture / In: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. 2014. P. 487–504. DOI: [10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9).
75. *She L., Xue Y., Yang X., Guang J., Li Y., Che Y., Fan C., Xie Y.* Dust Detection and Intensity Estimation Using Himawari-8/AHI Observation // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. 490. DOI: [10.3390/rs10040490](https://doi.org/10.3390/rs10040490).
76. *Sullivan R.C., Sergio A., Guazzotti S.A., Sodeman D.A., Tang Y., Carmichael G.R., Prather K.A.* Mineral dust is a sink for chlorine in the marine boundary layer // *Atmospheric Environment*. 2007. Vol. 41. Iss. 34. P. 7166–7179. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.05.047](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.047).
77. *Sun K., Su Q., Ming Y.* Dust Storm Remote Sensing Monitoring Supported by MODIS Land Surface Reflectance Database // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 1772. DOI: [10.3390/rs11151772](https://doi.org/10.3390/rs11151772).
78. *Taheria F., Forouzani M., Yazdanpanah M., Ajilib A.* How farmers perceive the impact of dust phenomenon on agricultural production activities: A Q-methodology study // *Journal of Arid Environments*. 2020. Vol. 173. 104028. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2019.104028](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104028).
79. *Tegen I., Hollrig P., Chin M., Fung I., Jacob D., Penner J.* Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 23895–23915.
80. *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 // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. L05105. DOI: [10.1029/2003GL019216](https://doi.org/10.1029/2003GL019216).
81. *Textor C. et al.* Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. Vol. 6. P. 1777–1813.
82. *Twomey S.* *Atmospheric Aerosols*. Amsterdam: Elsevier, 1977. 348 p.
83. *Ulanowski Z., Bailey J., Lucas P.W., Hough J.H., Hirst E.* Alignment of atmospheric mineral dust due to electric field // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. No. 7. P. 6161–6173.
84. *Varga G., Dagsson-Waldhauserová P., Gresina F. et al.* Saharan dust and giant quartz particle transport towards Iceland // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. 11891. DOI: [10.1038/s41598-021-91481-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91481-z).
85. *van der Does M., Knippertz P., Zschenderlein P., Giles Harrison R., Stuut J.-B. W.* The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles // *Sci. Adv.* 2018. Vol. 4. No. 12. eaau2768. DOI: [10.1126/sciadv.aau2768](https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2768).
86. *Volten H., Minoz O., Rol E., de Haan J., Vassen W., Hovenier J.*

Laboratory measurements of mineral dust scattering phase function and linear polarization // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 17375–401.

87. *Wagner J., Ansmann A., Wandinger U., Seifert P., Schwarz A., Tesche M., Chaikovskiy A., Dubovik O.* Evaluation of the Lidar/Radiometer Inversion Code (LIRIC) to determine microphysical properties of volcanic and desert dust // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. Vol. 6. P. 1707–1724. DOI: [10.5194/amt-6-1707-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-1707-2013).

88. *Wang T., Han Y., Hua W., Tang J., Huang J., Zhou T., Huang Zh., Bi J., Xie H.* Profiling Dust Mass Concentration in Northwest China Using a Joint Lidar and Sun-Photometer Setting // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13 (6). 1099. DOI: [10.3390/rs13061099](https://doi.org/10.3390/rs13061099).

89. *Weiss L., Stainsby E.A., Gharabaghi B., Thé J., Winter J.G.* Mapping key agricultural sources of dust emissions within the Lake Simcoe airshed // *Inland Waters.* 2013. Vol. 3 : 2. P. 153–166. DOI: [10.5268/IW-3.2.516](https://doi.org/10.5268/IW-3.2.516).

90. *Wittmaack K., Wehnes H., Heinzmann U., Agerer R.* An overview on bioaerosols viewed by scanning electron microscopy // *Science of The Total Environment.* 2005. Vol. 346. Iss. 1–3 (15). P. 244–255.

91. *Yu H., Tan Q., Chin M., Remer L.A., Kahn R.A., Bian H., Kim D., Zhang Z., Yuan T., Omar A.H. et al.* Estimates of African Dust Deposition Along the Trans-Atlantic Transit Using the Decadelong Record of Aerosol Measurements from CALIOP, MODIS, MISR, and IASI // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2019. Vol. 124. P. 7975–7996.

92. *Zhang M.X., Zhao C., Cong Z.Y., Du Q.Y., Xu M.Y., Chen Y., Chen M., Li R., Fu Y.F., Zhong L. et al.* Impact of topography on black carbon transport to the southern Tibetan Plateau during the pre-monsoon season and its climatic implication // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. Vol. 20. P. 5923–5943. DOI: [10.5194/acp-20-5923-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-5923-2020).

93. *Zheng G., He K., Duan F., Cheng Yu., Ma Y.* Measurement of humic-like substances in aerosols: A review // *Environmental Pollution.* 2013. Vol. 181. P. 301–314. DOI: [10.1016/j.envpol.2013.05.055](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.055).

94. *Zucca C., Middleton N., Kang U., Liniger H.* Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management // *CATENA.* 2021. Vol. 207. 105669. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105669](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669).

## REFERENCES

1. Abdullaev S.F., *Kompleksnye issledovaniya pylevykh i gazovykh primesei v aridnykh zonakh i ikh vliyanie na regional'nyi klimaticheskii rezhim yugovostochnoi chasti Tsentral'noi Azii: Dis. ... dok. fiz.-mat. nauk* (Complex studies of dust and gas impurities in arid zones and their influence on regional

- climatic regime of South-Eastern part of Central Asia, Dr. phys. and math. sci. thesis), 25.00.30, St. Petersburg, 2014, 315 p.
2. Andronova A.V., Sokolik I.N., Opticheskie postoyannye pylevogo aerizolya (Optical constants of dust aerosol), In: *Sovetsko-amerikanskii eksperiment po izucheniyu aridnogo aerizolya* (Soviet-American experiment on arid aerosol studies), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, pp. 95–103.
  3. Beresnev S.A., Gryazin V.I., Fizika atmosferykh aerizolei: Kurs lektsii (Physics of atmospheric aerosols: Course of lectures), Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2008, 227 p.
  4. Bretshnaider B., Kurfyurst I., *Okhrana vozdušnogo basseina ot zagryaznenii: tekhnologiya i kontrol'* (Protection of air basin from pollution: technology and control), Leningrad: Khimiya, 1989, 288 p.
  5. Val'dberg A.Yu., Pyl' i dym (Dust and smoke), *Khimiya i zhizn'*, 1989, No. 4, pp. 71–76.
  6. Grin Kh., Lein V., *Aerizoli – pyli, dymy i tumany* (Aerosols – dusts, fumes and mists), Leningrad: Khimiya, 1972, 428 p.
  7. Egorov V.N., Khabarov D.A., *Opredelenie zapylennosti vozdukh (Metodicheskie ukazaniya)* (Determination of air dustiness (Methodological instructions)), Moscow: 2016.
  8. Ivlev L.S., *Khimicheskii sostav i struktura atmosferykh aerizolei* (Chemical composition and structure of atmospheric aerosols), Leningrad: Izd-vo Leningradskogo un-ta, 1982, 365 p.
  9. Ivlev L.S., Dovgalyuk Yu.A., *Fizika atmosferykh aerizol'nykh sistem* (Physics of Atmospheric Aerosol Systems), St. Petersburg: NIIKh SPbGU, 1999, 194 p.
  10. Isidorov V.A., *Ekologicheskaya khimiya* (ecological Chemistry), St. Petersburg: Khimizdat, 2001, 304 p.
  11. Kovda V.A., Rozanov B.G., *Pochvovedenie. Chast' I. Pochva i pochvoobrazovanie*. (Soil Science. Part 1. Soil and soil formation), Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 400 p.
  12. Kogut B.M., Sysuev S.A., Kholodov V.A., *Vodoprochnost' i labil'nye gumusovye veshchestva pri raznom zemlepol'zovanii* (Water resistance capacity and labile humus substances under different land use), *Pochvovedenie*, 2012, No. 5, pp. 555–561.
  13. Kogut B.M., Artem'eva Z.S., Kirillova N.P., Yashin M.A., Soshnikova E.I., *Komponentnyi sostav organicheskogo veshchestva vozdušno-sukhikh i vodoustoichivnykh makroagregatov tipichnogo chernozema v usloviyakh kontrastnogo zemlepol'zovaniya* (Component composition of organic matter of air-dry and water-stable macroaggregates of typical chernozem under contrasting land use), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 161–170.

14. Kononova E.S., Pronin S.P., *Obzor sovremennykh tekhnicheskikh sredstv izmereniya i kontrolya vzheshennykh chastits v atmosfernom vozdukh*e (Review of modern technical means of measurement and control of suspended solids in atmospheric air), *Polzunovskii Al'manakh*, 2017, Vol. 3, No. 4, pp. 77–80.
15. Grigor'ev A.A., *Kratkaya geograficheskaya entsiklopediya* (Concise Geographic Encyclopedia), Vol. 3, Moscow: Sovetsvkaya entsiklopediya, 1962, 580 p.
16. Mamaeva N.Yu., *Instruktsiya po opredeleniyu zapylenosti vozdukha* (Instruction for determining air dustiness), In: *Laboratornye metodiki i tekhnologicheskie instruktsii v konservatsii dokumentov* (Laboratory techniques and technological instructions in document conservation), 2016, pp. 28–38.
17. Mamontov V.G., *Pochvovedenie: spravochnik* (Soil Science: Handbook), Moscow: FORUM: INFRA-M, 2020, 365 p.
18. Pronin S.P., Kononova E.S., Kal'noi D.G., *Metodicheskoe i tekhnicheskoe obespechenie lokal'noi sistemy ekologicheskogo monitoringa atmosfery* (Methodological and technical support of local system of ecological monitoring of atmosphere), *Polzunovskii Vestnik*, 2010, No. 2, pp. 188–192.
19. Novikov V.T., *Oborudovanie i osnovy proektirovaniya sistem okhrany okruzhayushchei sredy. Chast' I. Pyl', ee svoystva i pyleulavliwanie* (Equipment and basics of designing environmental protection systems. Part 1. Dust, its properties and dust collection), Tomsk: Izd. TPU, 2003, 176 p.
20. Petryanov-Sokolov I.V., *Izbrannye trudy. Zakony fil'tratsii aerolei* (Selected Works. Laws of aerosol filtration), Moscow: Nauka, 2007, 458 p.
21. Pirumov A.I., *Obespylivanie vozdukha* (Air cleaning from dust), Moscow: Stroiizdat, 1974, 207 p.
22. Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu., *Modern techniques for monitoring wind soil erosion*, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 104, pp. 110–157, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-104-110-157](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-110-157).
23. Rudyak V.Ya., *Statisticheskaya mekhanika geterogennykh sred. IV. Printsipy klassifikatsii* (Statistical mechanics of heterogeneous medium. IV. Principles of classification.), Novosibirsk, 1995, 19 p. (Preprint / Novosib. gos. akademiya stroitel'stva; No. 3(8)).
24. Trifonov K.I., Devisilov V.A., *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnosfere* (Physical and chemical processes in technosphere), Moscow: FORUM, 2007, 240 p.
25. Fellenberg G., *Zagryaznenie prirodnoi sredy. Vvedenie v ekologicheskuyu khimiyu* (Pollution of the natural environment. Introduction to ecological chemistry), Moscow: Mir, 1997, 232 p.
26. Fuks N.A., *Mekhanika aerolei* (Aerosol Mechanics), Moscow: Izd-vo:

М.: Mir, 1955, 369 p.

27. Adebisi A.A., Kok J.F. Climate models miss most of the coarse dust in the atmosphere, *Science Advances*, 2020, Vol. 6 (15), eaaz9507, DOI: [10.1126/sciadv.aaz9507](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9507).

28. Andreae M.O., Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels, In A. Henderson-Sellers (Ed.) *Future Climates of the World: A Modelling Perspective, World Survey of Climatology*, 1995, Vol. 16, New York: Elsevier, pp. 347–398.

29. Ansmann A., Müller D., Lidar and Atmospheric Aerosol Particles, In: Weitkamp C. (Ed.) *Lidar, Springer Series in Optical Sciences*, 2005, Vol. 102, Springer, DOI: [10.1007/0-387-25101-4\\_4](https://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_4).

30. Ansmann A., Tesche M., Seifert P., Gross S., Freudenthaler V., Apituley A., Wilson K.M., Serikov I., Linne H., Heinold B. et al., Ash and fine-mode particle mass profiles from EARLINET-AERONET observations over central Europe after the eruptions of the Eyjafjallajökull volcano in 2010, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2011, Vol. 116, D00U02, DOI: [10.1029/2010JD015567](https://doi.org/10.1029/2010JD015567).

31. Attiya A.A., Jones B.G., Assessment of mineralogical and chemical properties of airborne dust in Iraq, *SN Appl. Sci.*, 2020, Vol. 2, 1614, DOI: [10.1007/s42452-020-03326-5](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03326-5).

32. Baensch-Baltruschat B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G., Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment, *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 733, 1378237, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137823](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823).

33. Bauer E., Ganopolski A., Sensitivity simulations with direct radiative forcing by aeolian dust during glacial cycles, *Climate of the Past.*, 2014, Vol. 10 (4), pp. 149–193, DOI: [10.5194/cp-10-1333-2014](https://doi.org/10.5194/cp-10-1333-2014).

34. d’Almeida G.A. et al., *Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics*, New York: A. Deepak, 1991.

35. Cadle R.D., *Particles in the Atmosphere and Space*, New York: Reinhold, 1966, 226 p.

36. Choi J.C., Lee M., Chun Y., Kim J., Oh S., Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul, Korea, *J. Geophys. Res.*, 2001, Vol. 106, pp. 18067–71.

37. Falkovich A.H., Schkolnik G., Ganor E., Rudich Y., Adsorption of organic compounds pertinent to urban environments onto mineral dust particles, *Journal of geophysical research. Atmospheres*, 2004, Vol. 109, Iss. D2, DOI: [10.1029/2003JD003919](https://doi.org/10.1029/2003JD003919).

38. Freedman F.R., English P., Wagner J., Liu Y., Venkatram A., Tong D.Q., Al-Hamdan M.Z., Sorek-Hamer M., Chatfield R., Rivera A., Kinney P.L., Spatial Particulate Fields during High Winds in the Imperial Valley,

*California. Atmosphere*, 2020, Vol. 11, 88, DOI: [10.3390/atmos11010088](https://doi.org/10.3390/atmos11010088).

39. Formenti P., Schütz L., Balkanski Y., Desboeufs K., Ebert M. et al., Recent progress in understanding physical and chemical properties of African and Asian mineral dust, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11 (16), pp. 8231–8256, DOI: [10.5194/acp-11-8231-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-8231-2011).

40. Formenti P., Caquineau S., Desboeufs K., Klaver A., Chevaillier S., Journet E., Rajot J.L., Mapping the physico-chemical properties of mineral dust in western Africa: mineralogical composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, Vol. 14, pp. 10663–10686, DOI: [10.5194/acp-14-10663-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-10663-2014).

41. Ginoux P., Prospero J., Gill T., Hsu N., Zhao M., Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products, *Rev. Geophys.*, 2012, Vol. 50, RG3005, DOI: [10.1029/2012RG000388](https://doi.org/10.1029/2012RG000388).

42. Goel V., Mishr S.K., Pal P., Ahlawat A., Vijayan N., Jain S., Sharma Ch., Influence of chemical aging on physico-chemical properties of mineral dust particles: A case study of 2016 dust storms over Delhi, *Environmental Pollution*, 2020, Vol. 267, 115338, DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115338](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115338).

43. Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C., Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements, *Environmental Science & Technology*, 2012, Vol. 46 (12), pp. 6523–6529, DOI: [10.1021/es300894r](https://doi.org/10.1021/es300894r).

44. Hatch C., Gierlus K., Schuttlefield Christus J., Grassian V., Water adsorption and cloud condensation nuclei activity of calcite and calcite coated with model humic and fulvic acids, *Atmospheric Environment*, 2008, Vol. 42, pp. 5672–5684, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.03.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.005).

45. Hess M., Koepke P., Schult I., Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, *Bull. Am. Met. Soc.*, 1998, Vol. 79, Iss. 5, pp. 831–844.

46. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A., *Climate Change 2001: the Scientific Basis*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

47. Huneus N. et al., Global dust model intercomparison in AeroCom phase I, *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, Vol. 11, pp. 7781–7816.

48. Huang J., Liu J., Chen B., Nasiri S., Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, Vol. 15, pp. 11653–11665, DOI: [10.1126/science.1106335](https://doi.org/10.1126/science.1106335).

49. Ibrahim S., Romanias M.N., Alleman L.Y., Zeineddine M.N., Angeli G.K., Trikalitis P.N., Thevenet F., Water Interaction with Mineral Dust Aerosol: Particle Size and Hygroscopic Properties of Dust, *ACS Earth and Space Chemistry*, 2018, Vol. 2 (4), pp. 376–386, DOI:

[10.1021/acsearthspacechem.7b00152](https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.7b00152).

50. Jaenicke R., Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere, *Science*, 2005, Vol. 308, 73, DOI: [10.1126/science.1106335](https://doi.org/10.1126/science.1106335).

51. Jin S., Ma Y., Zhang M., Gong W., Dubovik O., Liu B., Shi Y., Yang C., Retrieval of 500 m Aerosol Optical Depths from MODIS Measurements over Urban Surfaces under Heavy Aerosol Loading Conditions in Winter, *Remote Sens.*, 2019, Vol. 11, 2218, DOI: [10.3390/rs11192218](https://doi.org/10.3390/rs11192218).

52. Kalashnikova O.V., Sokolik I.N., Modeling the radiative properties of nonspherical soil-derived mineral aerosols, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, Vol. 87, pp. 137–166, DOI: [10.1016/j.jqsrt.2003.12.026](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2003.12.026).

53. Kandler K., Scheuevens D., Asian and Saharan dust from a chemical/mineralogical point of view: differences and similarities from bulk and single particle measurements, *Central Asian Dust Conference (CADUC)*, 2019, Vol. 99, 03001, DOI: [10.1051/e3sconf/20199903001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199903001).

54. Katra I., Soil Erosion by Wind and Dust Emission in Semi-Arid Soils Due to Agricultural Activities, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, 89, DOI: [10.3390/agronomy10010089](https://doi.org/10.3390/agronomy10010089).

55. Kaufman Y.J., Koren I., Remer L.A., Tanre D., Ginoux P., Fan S. Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2005, Vol. 110, D10S12, DOI: [10.1029/2003JD004436](https://doi.org/10.1029/2003JD004436).

56. Kok J.F., Ridley D.A., Zhou Q., Miller R.L., Zhao C., Heald C.L., Ward D.S., Albani S., Haustein K. Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance, *Nature Geoscience*, 2017, Vol. 10 (4), pp. 274–278, DOI: [10.1038/ngeo2912](https://doi.org/10.1038/ngeo2912).

57. Kokhanovsky A.A., *Aerosol Optics. Light absorption and scattering by particles in the atmosphere*, Springer, 2008, 146 p.

58. Kokhanovsky A.A., Leeuw G., *Satellite aerosol remote sensing over land*, 2009, Springer, 388 p.

59. Lafon S., Rafot J.L., Alfaro S.C., Gomes L., Maill M., Gaudichet A., Iron status in mineral desert aerosols, In: *IAMAS Congress*, No. 2 in 5, AMS, 2001.

60. Li X., Yang K., Han J., Ying Q., Hopke P.K., Sources of humic-like substances (HULIS) in PM<sub>2.5</sub> in Beijing: Receptor modeling approach, *Sci Total Environ.*, 2019, Vol. 671, pp. 765–775, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.03.333](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.333).

61. Mahowald N.M., Rivera G.D.R., Luo C., Comment on “Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission” by I. Tegen et al., *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, DOI: [10.1029/2004GL021272](https://doi.org/10.1029/2004GL021272).

62. Mamouri R.E., Ansmann A., Potential of polarization. Raman lidar to separate fine dust, coarse dust, maritime, and anthropogenic aerosol profiles, *Atmos. Meas. Tech.*, 2017, Vol. 10, 3403–3427, DOI: [10.5194/amt-10-3403-2017](https://doi.org/10.5194/amt-10-3403-2017).
63. Maring H., Savoie D.L., Izaguirre M.A., Custals L., Mineral dust aerosol size distribution change during atmospheric transport, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, Vol. 108 (19), DOI: [10.1029/2002JD002536](https://doi.org/10.1029/2002JD002536).
64. Minoz O., Volten H., de Haan J., Vassen W., Hovenier J., Experimental determination of scattering matrices of randomly oriented fly ash at 442 and 633 nm, *J. Geophys. Res.*, 2001, Vol. 106, pp. 22833–45.
65. Miller R.L., Cakmur R.V., Perlwitz J., Geogdzhayev I.V., Ginoux P., Koch D., Kohfeld K.E., Prigent C., Ruedy R., Schmidt G.A., Tegen I., Mineral dust aerosols in the NASA Goddard Institute for Space Sciences ModelE atmospheric general circulation model, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, Vol. 111, D06208, DOI: [10.1029/2005JD005796](https://doi.org/10.1029/2005JD005796).
66. Mona L., Liu Z., Müller D., Omar A., Papayannis A., Pappalardo G., Sugimoto N., Vaughan M., Lidar Measurements for Desert Dust Characterization: An Overview, *Advances in Meteorology*, 2012, Article ID 356265, DOI: [10.1155/2012/356265](https://doi.org/10.1155/2012/356265).
67. Muhs D.R., Prospero J.M., Baddock M.C., Gill T.E., Identifying sources of aeolian mineral dust: Present and past, In: *Mineral dust: A key player in the earth system*, 2014, pp. 51–74, DOI: [10.1007/978-94-017-8978-3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3).
68. Nemuc A., Vasilescu J., Talianu C., Belegante L., Nicolae D., Assessment of aerosol's mass concentrations from measured linear particle depolarization ratio (vertically resolved) and simulations, *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, Vol. 6, pp. 3243–3255, DOI: [10.5194/amt-6-5923-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-5923-2013).
69. Okada K., Heintzenberg J., Kai K., Qin Y., Shape of atmospheric mineral particles collected in three Chinese arid-regions, *Geophys. Res. Lett.*, 2001, Vol. 28, 3123–3126, DOI: [10.1029/2000GL012798](https://doi.org/10.1029/2000GL012798).
70. Prospero J.M., Ginoux P., Torres O., Nicholson S., Gill T., Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust derived from the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Rev. Geophys.*, 2002, Vol. 40 (1), 1002, DOI: [10.1029/2000RG000095](https://doi.org/10.1029/2000RG000095).
71. Prudnikova E.Y., Savin I.Y., Lebedeva M.P. et al., Transformation of the Surface Layer in the Arable Soil Horizon under the Impact of Atmospheric Precipitation, *Eurasian Soil Sc.*, 2021, Vol. 54, pp. 1770–1781, DOI: [10.1134/S1064229321110119](https://doi.org/10.1134/S1064229321110119).
72. Reid J.S. et al., Comparison of size and morphological measurements of coarse mode dust particles from Africa, *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, 8593, DOI: [10.1029/2002JD002485](https://doi.org/10.1029/2002JD002485).

73. Ryder C.L., Highwood E.J., Walser A., Seibert P., Philipp A., Weinzierl B., Coarse and giant particles are ubiquitous in saharan dust export regions and are radiatively significant over the Sahara, *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, Vol. 19, pp. 15353–15376, DOI: [10.5194/acp-19-15353-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-15353-2019).
74. Sharratt B., Auvermann B., Dust Pollution from Agriculture, In: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 2014, pp. 487–504, DOI: [10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00089-9).
75. She L., Xue Y., Yang X., Guang J., Li Y., Che Y., Fan C., Xie Y., Dust Detection and Intensity Estimation Using Himawari-8/AHI Observation, *Remote Sens.*, 2018, Vol. 10, 490, DOI: [10.3390/rs10040490](https://doi.org/10.3390/rs10040490).
76. Sullivan R.C., Sergio A., Guazzotti S.A., Sodeman D.A., Tang Y., Carmichael G.R., Prather K.A., Mineral dust is a sink for chlorine in the marine boundary layer, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, Iss. 34, pp. 7166–7179, DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.05.047](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.047).
77. Sun K., Su Q., Ming Y., Dust Storm Remote Sensing Monitoring Supported by MODIS Land Surface Reflectance Database, *Remote Sens.*, 2019, Vol. 11, 1772, DOI: [10.3390/rs11151772](https://doi.org/10.3390/rs11151772).
78. Taheria F., Forouzani M., Yazdanpanah M., Ajilib A., How farmers perceive the impact of dust phenomenon on agricultural production activities: A Q-methodology study, *Journal of Arid Environments*, 2020, Vol. 173, 104028, DOI: [10.1016/j.jaridenv.2019.104028](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104028).
79. Tegen I., Hollrig P., Chin M., Fung I., Jacob D., Penner J., Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results, *J. Geophys. Res.*, 1997, Vol. 102, pp. 23895–23915.
80. 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, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, Vol. 31, L05105, DOI: [10.1029/2003GL019216](https://doi.org/10.1029/2003GL019216).
81. Textor C. et al., Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, Vol. 6, pp. 1777–1813.
82. Twomey S., *Atmospheric Aerosols*, Amsterdam: Elsevier, 1977, 348 p.
83. Ulanowski Z., Bailey J., Lucas P.W., Hough J.H., Hirst E., Alignment of atmospheric mineral dust due to electric field, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, No. 7, pp. 6161–6173.
84. Varga G., Dagsson-Waldhauserová P., Gresina F. et al., Saharan dust and giant quartz particle transport towards Iceland, *Sci. Rep.*, 2021, Vol. 11, 11891, DOI: [10.1038/s41598-021-91481-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91481-z).
85. van der Does M., Knippertz P., Zschenderlein P., Giles Harrison R., Stuut J.-B. W., The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles,

*Sci. Adv.*, 2018, Vol. 4, No. 12, eaau2768, DOI: [10.1126/sciadv.aau2768](https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2768).

86. Volten H., Minoz O., Rol E., de Haan J., Vassen W., Hovenier J., Laboratory measurements of mineral dust scattering phase function and linear polarization, *J. Geophys. Res.*, 2001, Vol. 106, pp. 17375–401.

87. Wagner J., Ansmann A., Wandinger U., Seifert P., Schwarz A., Tesche M., Chaikovsky A., Dubovik O., Evaluation of the Lidar/Radiometer Inversion Code (LIRIC) to determine microphysical properties of volcanic and desert dust, *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, Vol. 6, pp. 1707–1724, DOI: [10.5194/amt-6-1707-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-1707-2013).

88. Wang T., Han Y., Hua W., Tang J., Huang J., Zhou T., Huang Zh., Bi J., Xie H., Profiling Dust Mass Concentration in Northwest China Using a Joint Lidar and Sun-Photometer Setting, *Remote Sens.*, 2021, Vol. 13 (6), 1099, DOI: [10.3390/rs13061099](https://doi.org/10.3390/rs13061099).

89. Weiss L., Stainsby E.A., Gharabaghi B., Thé J., Winter J.G., Mapping key agricultural sources of dust emissions within the Lake Simcoe airshed, *Inland Waters*, 2013, Vol. 3 : 2, pp. 153–166, DOI: [10.5268/IW-3.2.516](https://doi.org/10.5268/IW-3.2.516).

90. Wittmaack K., Wehnes H., Heinzmann U., Agerer R., An overview on bioaerosols viewed by scanning electron microscopy, *Science of The Total Environment*, 2005, Vol. 346, Vol. 1–3, 15, pp. 244–255.

91. Yu H., Tan Q., Chin M., Remer L.A., Kahn R.A., Bian H., Kim D., Zhang Z., Yuan T., Omar A.H. et al., Estimates of African Dust Deposition Along the Trans-Atlantic Transit Using the Decadelong Record of Aerosol Measurements from CALIOP, MODIS, MISR, and IASI, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2019, Vol. 124, pp. 7975–7996.

92. Zhang M.X., Zhao C., Cong Z.Y., Du Q.Y., Xu M.Y., Chen Y., Chen M., Li R., Fu Y.F., Zhong L. et al., Impact of topography on black carbon transport to the southern Tibetan Plateau during the pre-monsoon season and its climatic implication, *Atmos. Chem. Phys.*, 2020, Vol. 20, pp. 5923–5943, DOI: [10.5194/acp-20-5923-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-5923-2020).

93. Zheng G., He K., Duan F., Cheng Yu., Ma Y., Measurement of humic-like substances in aerosols: A review, *Environmental Pollution*, 2013, Vol. 181, pp. 301–314, DOI: [10.1016/j.envpol.2013.05.055](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.055).

94. Zucca C., Middleton N., Kang U., Liniger H., Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management, *CATENA*, 2021, Vol. 207, 105669, DOI: [10.1016/j.catena.2021.105669](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669).