

Короткопериодные вариации микрофизических характеристик наночастиц аэрозоля в сухостепной зоне юга России в летний период

Д.П. Губанова[✉], О.Г. Чхетиани, Л.О. Максименков*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 15.02.2024;
после доработки 26.03.2024;
принята к печати 28.03.2024

Активная роль наночастиц аэрозолей в гетерогенных процессах, приводящих к изменению оптических и физико-химических свойств атмосферы, состояния экосистем и климата, вызывает повышенный интерес к изучению механизмов их образования и трансформации. Условия аэрозолеобразования, его географические и сезонные особенности оказывают влияние на микрофизические характеристики высокодисперсного аэрозоля. В настоящей работе анализируются первые результаты полевых наблюдений за микрофизическими характеристиками наночастиц аэрозолей в приземном слое атмосферы сухостепной зоны юга России в летние периоды 2021 и 2022 гг. С учетом синоптико-метеорологических параметров изучены суточные вариации счетной концентрации и распределения по размерам наночастиц трех субфракций (нуклеационной моды, моды Айткена и переходной субфракции). Установлено постоянное наличие ярко выраженной моды Айткена независимо от времени суток и метеорологических условий. Выявлен минимум концентрации частиц нуклеационной моды и моды Айткена в ночные и предутренние часы. Наибольшая скорость генерации нуклеационных частиц характерна для утренних часов, когда интенсифицируются фотохимические процессы, обуславливающие утренний максимум концентрации частиц нуклеационной моды и моды Айткена. В ночные часы наблюдается рост концентрации частиц переходной субфракции. Рассмотрены особенности короткопериодной временной изменчивости характеристик высокодисперсного аэрозоля в сухостепной зоне юга России с учетом общей картины суточной динамики аэрозолеобразования и последующего роста частиц в атмосфере, а также в сравнении с результатами аналогичных наблюдений в других географических районах мира. Настоящая работа направлена на восполнение существующего пробела в экспериментальных данных о наночастицах аэрозолей в европейской части России. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании состава атмосферы, а также в химико-транспортных моделях при уточнении вклада аэрозолей в прямой и косвенный радиационный эффект, а также в процессы изменения климата.

Ключевые слова: атмосфера, сухостепная зона, юг России, аэрозоль, наночастицы, нуклеационная мода, мода Айткена, переходная субфракция, счетная концентрация, суточный ход, распределение по размерам частиц, метеорологические параметры; atmosphere, dry steppe zone, south of Russia, aerosol, nanoparticles, nucleation mode, Aitken mode, transient subfraction, counting concentration, daily variation, particle size distribution, meteorological parameters.

Введение

Атмосферные аэрозоли и малые газовые примеси в значительной степени определяют радиационный режим, оптические и химические свойства земной атмосферы. Это связано с их активной ролью в химических и фотохимических процессах, приводящих к изменению глобальных характеристик атмосферы и климата Земли [1]. Аэрозольные частицы в атмосфере весьма разнообразны по своему

дисперсному и химическому составу, который преобладает сильную пространственную и временную изменчивость. Размер аэрозольных частиц — важнейшая характеристика, зависящая от их природы и обуславливающая реакционную способность. Субмикронные и микронные частицы, составляющие средне- и грубодисперсную фракции и входящие в так называемую аккумуляционную моду ($d > 0,3$ мкм) [1–5], относятся к первичным аэрозолям, поступающим в атмосферу непосредственно от природных или антропогенных источников. Они вносят основной вклад в прямой радиационный форсинг, связанный с поглощением и рассеянием излучения на частицах атмосферного аэрозоля [1]. Эти частицы в настоящее время наиболее глубоко

* Дина Петровна Губанова (gubanova@ifaran.ru);
Отто Гурамович Чхетиани (ochkheti@ifaran.ru); Леонид
Олегович Максименков (maksimenkov@ifaran.ru).

изучены, а их параметры используются в качестве критериев качества воздуха в российских и международных стандартах [6].

Частицы самых малых размеров ($d = 1\text{--}100$ нм), или наночастицы, образование и рост которых происходят *in situ* в атмосфере в ходе преобразований «газ—частица», составляют микродисперсную фракцию, называемую также высокодисперсной, тонкодисперсной или ультрадисперсной. Они представляют собой вторичные аэрозоли, с которыми связан косвенный аэрозольный эффект, возникающий вследствие активного участия этих частиц в формировании облаков [1, 2, 4, 5].

Исследованию зарождения и роста аэрозольных частиц, а также их участия в облакообразовании на протяжении последних нескольких десятилетий уделяется большое внимание [2, 7–14]. Механизмы образования аэрозолей в условиях земной атмосферы уже достаточно хорошо изучены, краткий обзор на эту тему представлен, например, в работах [2, 14].

Процессы формирования и последующего преобразования вторичных аэрозолей уникальны тем, что они обуславливают трансформацию распределения частиц по размерам, тем самым изменяя их динамические свойства. Географические и сезонные различия также существенно влияют на распределение аэрозольных частиц по размерам [8, 15]. Для уменьшения неопределенностей, связанных с процессами взаимодействия аэрозоля и облаков, а также для решения проблем в области медицины и экологии необходима точная информация о пространственно-временном распределении наночастиц аэрозоля по размерам и его изменчивости при различных метеорологических условиях.

В настоящее время, несмотря на интенсивные полевые экспериментальные исследования микрофизических характеристик высокодисперсных частиц атмосферного аэрозоля в различных географических регионах мира, по-прежнему существует дефицит таких данных. Отечественными учеными наиболее активно подобные полевые наблюдения проводятся с конца 1990-х гг. в регионах Западной Сибири [4, 16–18], Забайкалья и в прибрежной зоне оз. Байкал [15, 19–25]. Кроме того, были исследованы состав, оптические и микрофизические характеристики микродисперсных фракций атмосферного аэрозоля на аридных территориях и в пустыне Гоби [11, 23, 24]. Однако в открытых источниках отсутствуют публикации, посвященные натурным наблюдениям наночастиц атмосферного аэрозоля в других регионах России, в частности в ее европейской части.

Настоящая работа призвана восполнить этот пробел. Ее целью является исследование короткопериодной изменчивости микрофизических характеристик наночастиц аэрозоля в приземном слое атмосферы сухостепной зоны юга России для понимания процессов образования, трансформации и переноса частиц в данном географическом регионе.

1. Материалы и методы

Анализ временных вариаций и суточного хода счетной концентрации и распределения по размерам наночастиц аэрозоля в приземном слое атмосферы сухостепной зоны юга европейской части России (ЕЧР) выполнен на основе результатов наблюдений на Цимлянской научной станции (ЦНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН). Станция расположена на северо-западной окраине г. Цимлянка Ростовской области на высоте 60 м н.у.м. ($48^{\circ}74'$ с.ш., $42^{\circ}66'$ в.д.) в 2,5 км от побережья Цимлянского водохранилища, в зоне природно-антропогенных степных ландшафтов, окруженных агроландшафтами и селитебной зоной г. Цимлянка.

Полевые кампании проводились в жаркие летние периоды 04–15.08.2021 г. и 03–13.08.2022 г. Выбор времени наблюдений был обусловлен сезонном наибольшей эмиссии солепылевых аэрозольных частиц с подстилающей поверхности при максимальной температуре воздуха в этом регионе. Климат на ЦНС ИФА РАН — европейский атлантико-континентальный, дефицит осадков составляет 200–400 мм. Более подробно условия наблюдений описаны в [25].

Измерение распределения по размерам и счетной концентрации микродисперсного аэрозоля осуществляли с временным разрешением 6 мин с помощью малопотокового диффузионного аэрозольного спектрометра ДСА-М [26–28], являющегося оригинальной разработкой Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН. В основе работы спектрометра ДСА-М лежит определение вероятности прохождения («проскока») аэрозольных частиц через набор сеток диффузионной батареи в зависимости от диаметра частиц. Распределение аэрозоля по размерам восстанавливается из счетной концентрации частиц, измеренной в разных каналах диффузионной батареи, с использованием известной зависимости коэффициента диффузии аэрозольных частиц от их размера [28]. Для проверки достоверности данных, получаемых с помощью ДСА-М, разработчиками прибора была успешно проведена интеркалибровка данного спектрометра с зарубежными приборами: анализатором частиц с дифференциальной подвижностью (DMPS — Differential Mobility Particle Sizer) и спектрометром нейтральных кластеров и аэроионов (NAIS — Neutral cluster and Air Ion Spectrometer) [27]. Следует также отметить, что спектрометр ДСА (в более ранних модификациях) хорошо зарекомендовал себя в различных полевых кампаниях [4, 15, 16, 18, 21, 22].

Метеорологические параметры измеряли каждую минуту с помощью метеостанции Davis Vantage Pro2 [29] на высоте 2 м от подстилающей поверхности. При интерпретации результатов экспериментов также использовали архивы метеоданных, находящиеся в открытом доступе, например [30].

Для оценки синоптической обстановки в периоды наблюдений привлекались онлайн-ресурсы. В частности, с помощью модели HYSPLIT-4 [31] на сайте ARL NOAA [32] на высоте 500 м рассчитывались трехсуточные обратные траектории переноса воздушных масс к пункту наблюдений.

При интерпретации и статистической обработке было выполнено осреднение исходных данных с временным разрешением 1 ч и 1 сут.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Синоптические и метеорологические условия

Основными факторами, определяющими климатические условия на юге ЕЧР, являются солнечная радиация и циркуляция атмосферы [33]. Август, как правило, характеризуется жаркой и засушливой погодой с суховеями и пыльными бурями. Во время полевых кампаний 2021 и 2022 гг. на ЦНС ИФА

РАН регистрировались метеорологические параметры, в целом сопоставимые со средними значениями, наблюдавшимися в это время года за последнее десятилетие, в том числе в периоды ранее проведенных натурных исследований [25, 34]. Температурно-влажностные условия, сопровождавшие полевые эксперименты 2021 и 2022 гг., соответствовали климатической норме второй половины XX — начала XXI в. для сухостепных районов юга России [33, 35] с учетом тенденции постепенного потепления климата [33]. Однако в августе 2022 г. наблюдалась самая высокая температура воздуха за последние 10 лет. В августе 2021 г. температура воздуха регистрировалась чуть выше многолетних средних значений [30], но ниже, чем в 2022 г. (рис. 1, табл. 1).

На рис. 1 представлен суточный ход метеорологических параметров и потока солнечной радиации, усредненный за все время полевых наблюдений в 2021 и 2022 гг. В табл. 1 приведены средние значения за период каждой из полевых кампаний

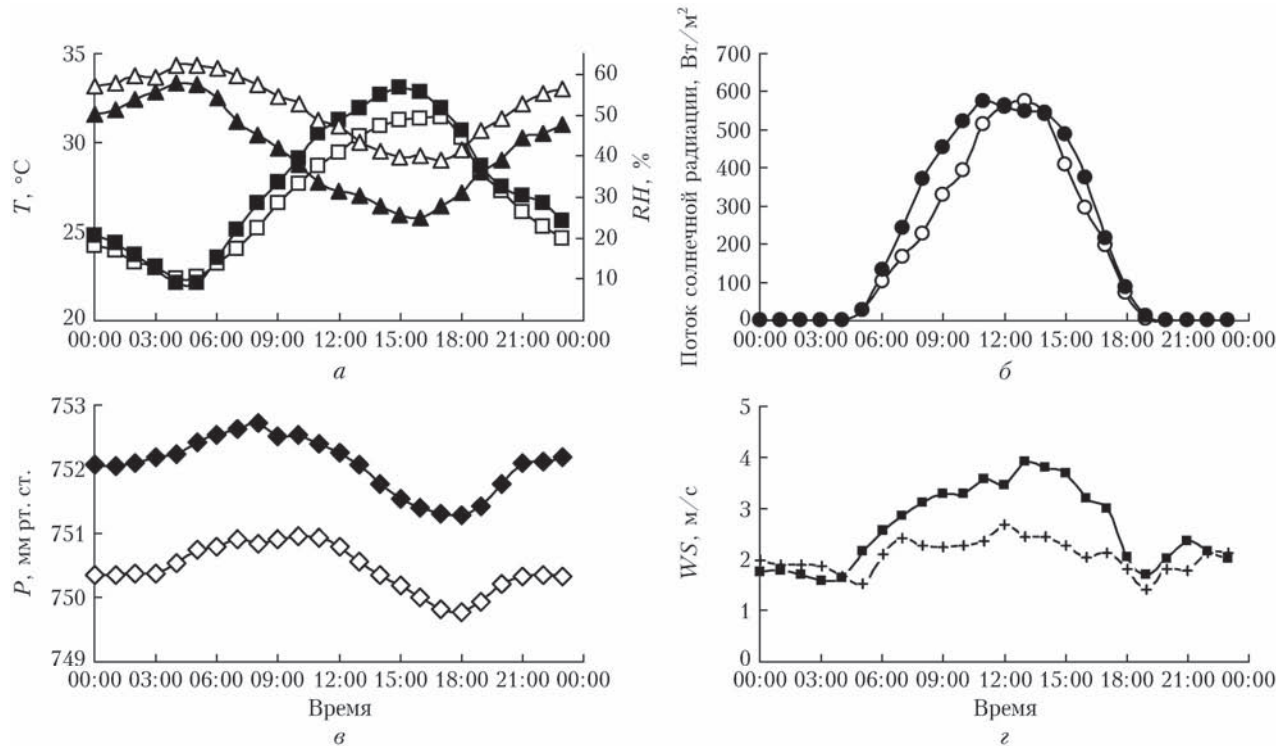


Рис. 1. Суточный ход среднечасовых значений метеорологических параметров, усредненный за периоды полевых кампаний 2021 (светлые символы) и 2022 гг. (темные символы): а — температуры (квадраты) и относительной влажности воздуха (треугольники); б — потока солнечной радиации; в — атмосферного давления; г — скорости ветра

Таблица 1

Средние значения за период полевой кампании $\pm$ СКО (максимальные среднесуточные значения метеорологических параметров)

Период	$T \pm \text{СКО} (T_{\max}), ^\circ\text{C}$	$RH \pm \text{СКО}, \%$	$WS \pm \text{СКО} (WS_{\max}), \text{ м/с}$	$P \pm \text{СКО}, \text{ мм рт. ст.}$
04–15.08.2021 г.	$26,92 \pm 3,36 (32,79)$	$50,84 \pm 9,55$	$2,19 \pm 1,13 (5,68)$	$750,24 \pm 0,73$
03–13.08.2022 г.	$27,90 \pm 4,05 (34,24)$	$39,65 \pm 13,45$	$2,75 \pm 1,36 (6,18)$	$752,10 \pm 0,60$

Примечание. В скобках указаны максимальные температура воздуха и скорость ветра, рассчитанные путем усреднения ежесуточных максимальных значений, определенных из массива данных за каждые сутки, за период каждой полевой кампании.

2021 и 2022 гг. среднесуточных температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления и скорости ветра. Как видно из рис. 1, на качественном уровне суточный ход всех исследуемых метеорологических параметров (за исключением скорости ветра) подобен и соответствует их многолетней суточной изменчивости. По абсолютным значениям 2022 г. отличается более высокими величинами всех параметров, за исключением относительной влажности воздуха.

Для данного района характерны широтный перенос воздушных масс с Атлантического океана, меридиональные северный и южный переносы, а также процессы трансформации воздуха в сторону его выхолаживания или прогрева над подстилающей поверхностью [35]. Равнинный рельеф благоприятствует свободному поступлению воздушных масс

различного происхождения. В исследуемый период (2021–2022 гг.), как показал анализ карт полей геопотенциалов и обратных траекторий движения воздушных масс, доминировали воздушные массы В–ВСВ и В–ВЮВ направлений, перемещаясь к пункту наблюдений на ЦНС ИФА РАН через территории Северного Прикаспия, Нижнего Поволжья, северо-западной части Казахстана и северной части Каспийского моря. Однако август 2021 г. отличался большей неустойчивостью синоптической обстановки, большими амплитудами колебаний атмосферного давления и относительной влажности воздуха, а также сменой воздушных масс в отдельные дни с вышеуказанного направления на ЗСЗ и Ю–ЮЮВ. Такая картина в целом подтверждается и розами ветров, представленными на рис. 2. При этом в августе 2022 г. наблюдалась более высокая скорость ветра.

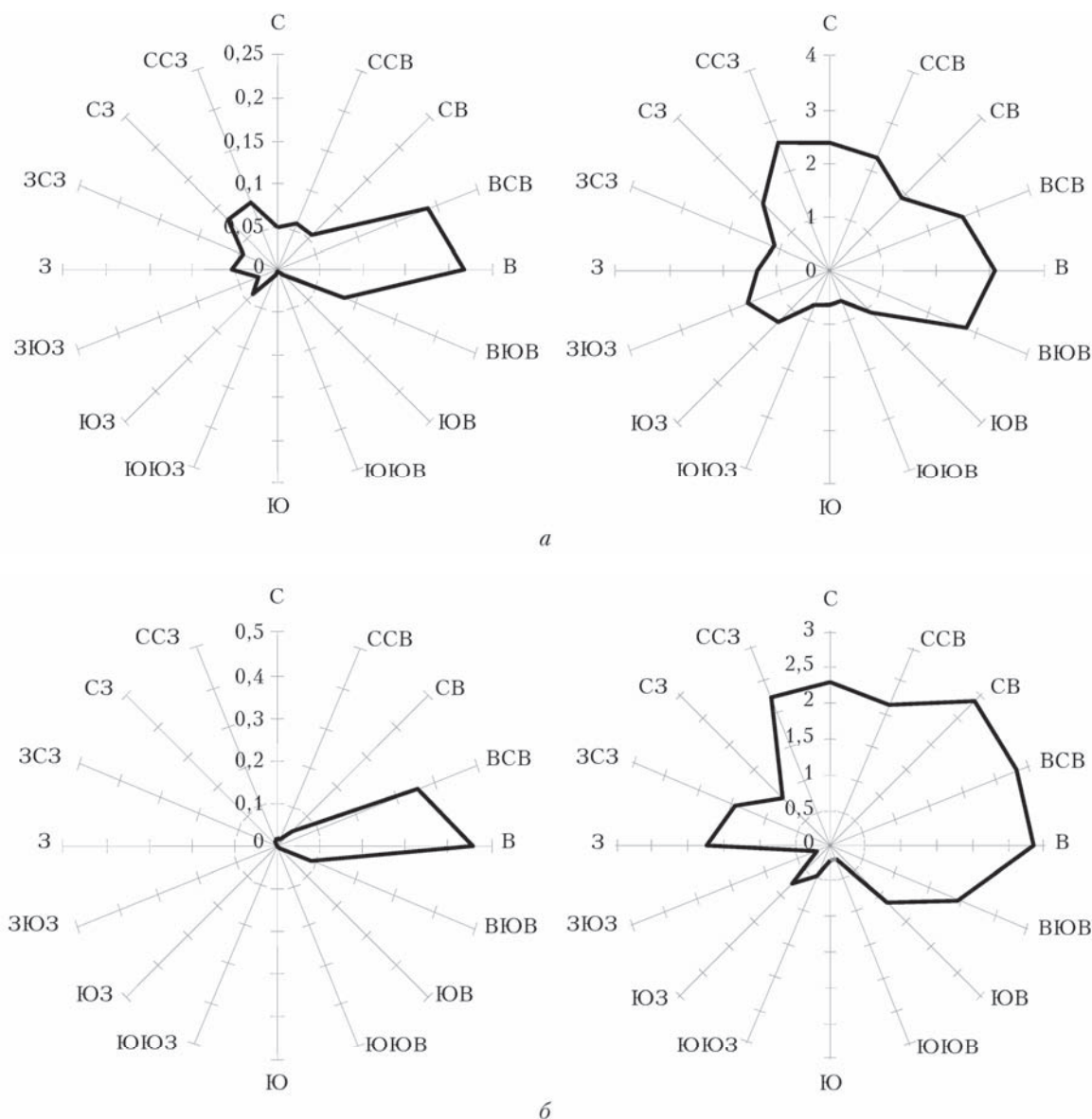


Рис. 2. Роза ветров (слева) и роза значений скорости ветра (справа) в периоды полевых кампаний 2021 г. (а); 2022 г. (б)

2.2. Временные вариации счетной концентрации наночастиц аэрозолей

Сухостепная зона юга России характеризуется высоким уровнем солнечной радиации, способствующей активному протеканию фотохимических процессов и созданию благоприятных условий для образования и роста наночастиц атмосферных аэрозолей. В настоящей работе исследуемые наноаэрозоли были разделены на три субфракции в соответствии с распространенной классификацией. Она основана на сравнении размера частиц с длиной свободного пробега λ молекул газа-носителя (в условиях нижней тропосферы $\lambda \approx 60$ нм). Самые мелкие наночастицы ($d = 1\text{--}10$ нм) относятся к нуклеационной моде. Они образуются в результате спонтанной нуклеации молекул низколетучих соединений в газовой фазе и преобразования в жидкие или твердые аэрозольные частицы. В результате последующей гетерогенной конденсации на них паров аэрозолеобразующих соединений происходит рост частиц до размеров, соизмеримых с длиной свободного пробега, которые образуют моду Айткена ($d = 10\text{--}100$ нм). Наночастицы этой субфракции обладают наибольшим временем жизни и служат ядрами конденсации облаков. Третья субфракция ($d = 100\text{--}300$ нм) — переходная — ответственна за переход частиц из моды Айткена в аккумуляционную фракцию аэрозоля за счет конденсации и коагуляции [2–5, 11].

На рис. 3 представлена временная изменчивость среднечасовых значений счетной концентрации нуклеационной моды, моды Айткена, переходной суб-

фракции и общей счетной концентрации наночастиц во время полевых наблюдений в августе 2021 и 2022 гг. Как видно, счетная концентрация разных субфракций наночастиц подвержена сильным флуктуациям с большой амплитудой. По абсолютным значениям счетные концентрации нуклеационной моды и моды Айткена и общая счетная концентрация наночастиц в августе 2022 г. были ниже, чем в этот же период 2021 г., что обусловлено различием синоптико-метеорологических условий и условий образования аэрозольных частиц.

Отличие характера временных вариаций счетной концентрации различных субфракций частиц связано с совокупностью факторов, способствующих образованию и трансформации наночастиц различных размеров. Вклад в общую счетную концентрацию частиц разных диапазонов размеров тоже различен. Мода Айткена составляет наибольшую долю (около 70%) от общей суммы наночастиц (рис. 4, табл. 2), нуклеационная мода — около 25%, а наименьший вклад в общую счетную концентрацию наноаэрозолей вносят частицы переходной субфракции. Временная изменчивость среднесуточной счетной концентрации различных субфракций частиц, а также описательная статистика за весь период наблюдений, приведенные на рис. 4 и в табл. 2 соответственно, подтверждают такую тенденцию. Более подробно на анализе короткопериодных вариаций концентрации наночастиц остановимся ниже при рассмотрении суточной динамики концентрации наночастиц различных субфракций.

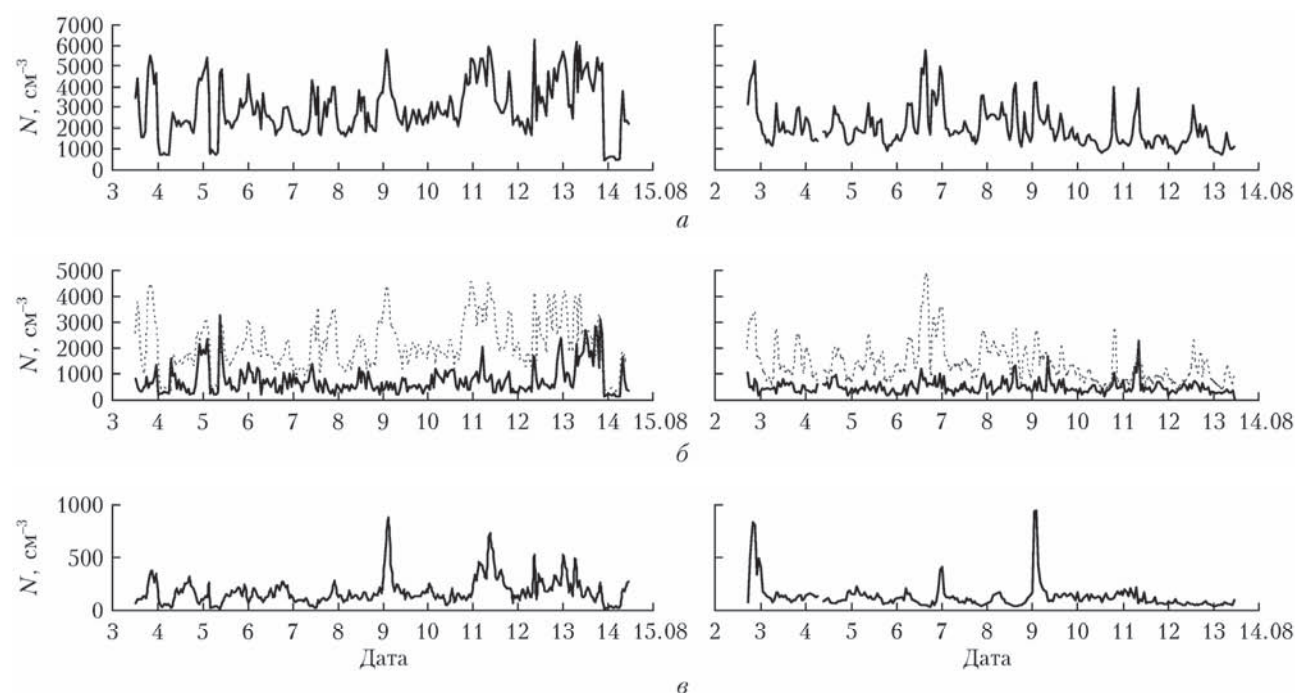


Рис. 3. Временной ход среднечасовых значений общей счетной концентрации наночастиц (а), счетной концентрации нуклеационной моды (черная кривая) и моды Айткена (пунктирная кривая) (б) и переходной субфракции (в) в периоды полевых кампаний 2021 (слева) и 2022 гг. (справа)

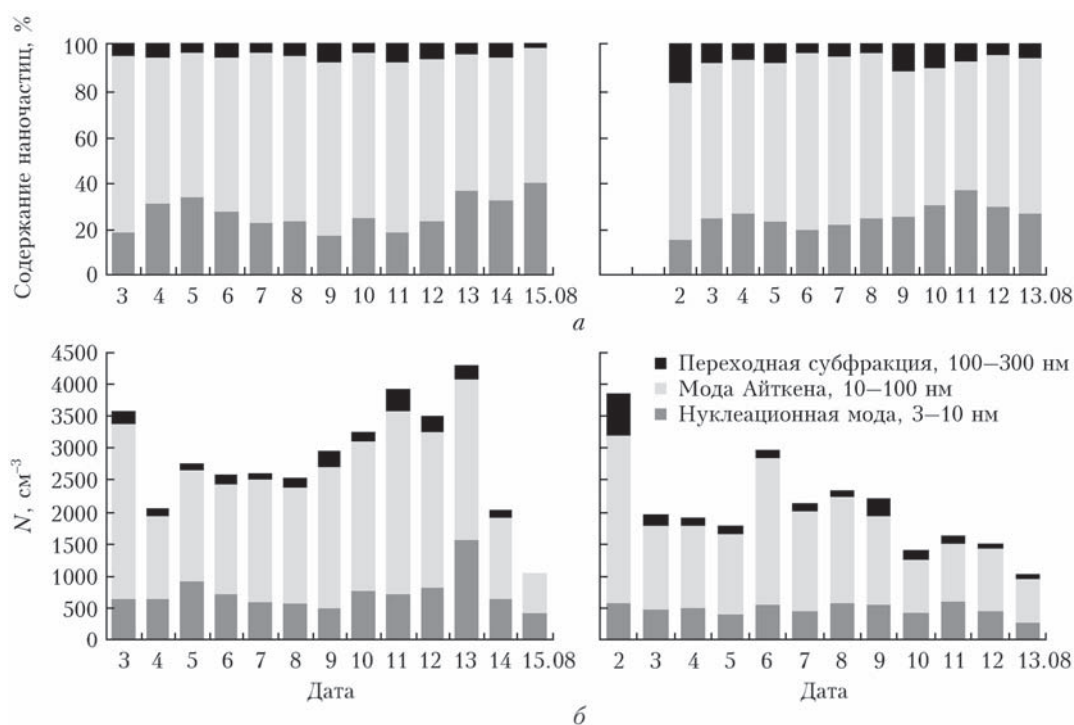


Рис. 4. Временные вариации среднесуточных значений общей счетной концентрации наночастиц, счетных концентраций нуклеационной моды, моды Айткена и переходной субфракции в периоды полевых кампаний 2021 (слева) и 2022 гг. (справа): *a* — процентное содержание наночастиц различных субфракций, *б* — счетная концентрация частиц

Таблица 2
Статистические показатели счетной концентрации наночастиц (см^{-3}) за весь период наблюдений в августе 2021 и 2022 гг.

Фракция	2021 г.		2022 г.	
	Среднее $\pm$ $\pm$ СКО	Медиана	Среднее $\pm$ $\pm$ СКО	Медиана
Нуклеационная мода	754 $\pm$ 941	424	492 $\pm$ 508	368
Мода Айткена	2012 $\pm$ 1344	1768	1333 $\pm$ 893	1164
Переходная субфракция	172 $\pm$ 177	129	154 $\pm$ 171	112
Общая концентрация	2939 $\pm$ 1680	2551	1970 $\pm$ 1053	1716

2.3. Суточный ход счетной концентрации наночастиц аэрозолей

Образование наночастиц аэрозолей сопровождается их очень быстрой коагуляцией. Экспериментально наблюдается результат совместного действия этих процессов, который всегда более медленный, чем это предсказывают нуклеационные теории [2]. Роль последующих процессов — роста и испарения отдельных аэрозольных частиц — также чрезвычайно высока, поскольку именно данный механизм наряду с коагуляцией отвечает за появление климатически активных частиц размерами до 1 мкм [2]. Суточная динамика счетной концентрации наночастиц различных субфракций отражает эту картину.

На рис. 5 показан суточный ход среднечасовых значений общей счетной концентрации наночастиц, счетных концентраций нуклеационной моды, моды Айткена и переходной субфракции, усредненный за периоды полевых кампаний в августе 2021 и 2022 гг. Как видно, для суточного хода концентраций наночастиц всех субфракций и общей счетной концентрации характерно наличие ярко выраженного минимума в ночные и предутренние часы. Ночью имеющая фотохимическую природу гомогенная нуклеация частиц затруднена, что приводит к уменьшению счетной концентрации наночастиц нуклеационной моды. Однако поскольку время жизни таких частиц — около суток [4, 16], то за ночь они не исчезают совсем.

С восходом солнца интенсифицируются фотохимические процессы, обуславливающие формирование новых наночастиц аэрозолей в атмосфере. Казалось бы, дневной максимум концентрации нуклеационной моды частиц должен совпадать с максимумом в суточном ходе интенсивности приходящей солнечной радиации, регистрируемым в исследуемом районе в полуденное время (см. рис. 1, б). Однако этого не наблюдалось во время полевых кампаний в августе 2021 и 2022 гг. Счетная концентрация частиц нуклеационной моды достигала максимума гораздо раньше, к 08:00–09:00 по местному времени. А далее, в дневное и ночное время до конца суток регистрировались флуктуации счетной концентрации нуклеационных частиц с небольшими максимумами и минимумами в дневное время.

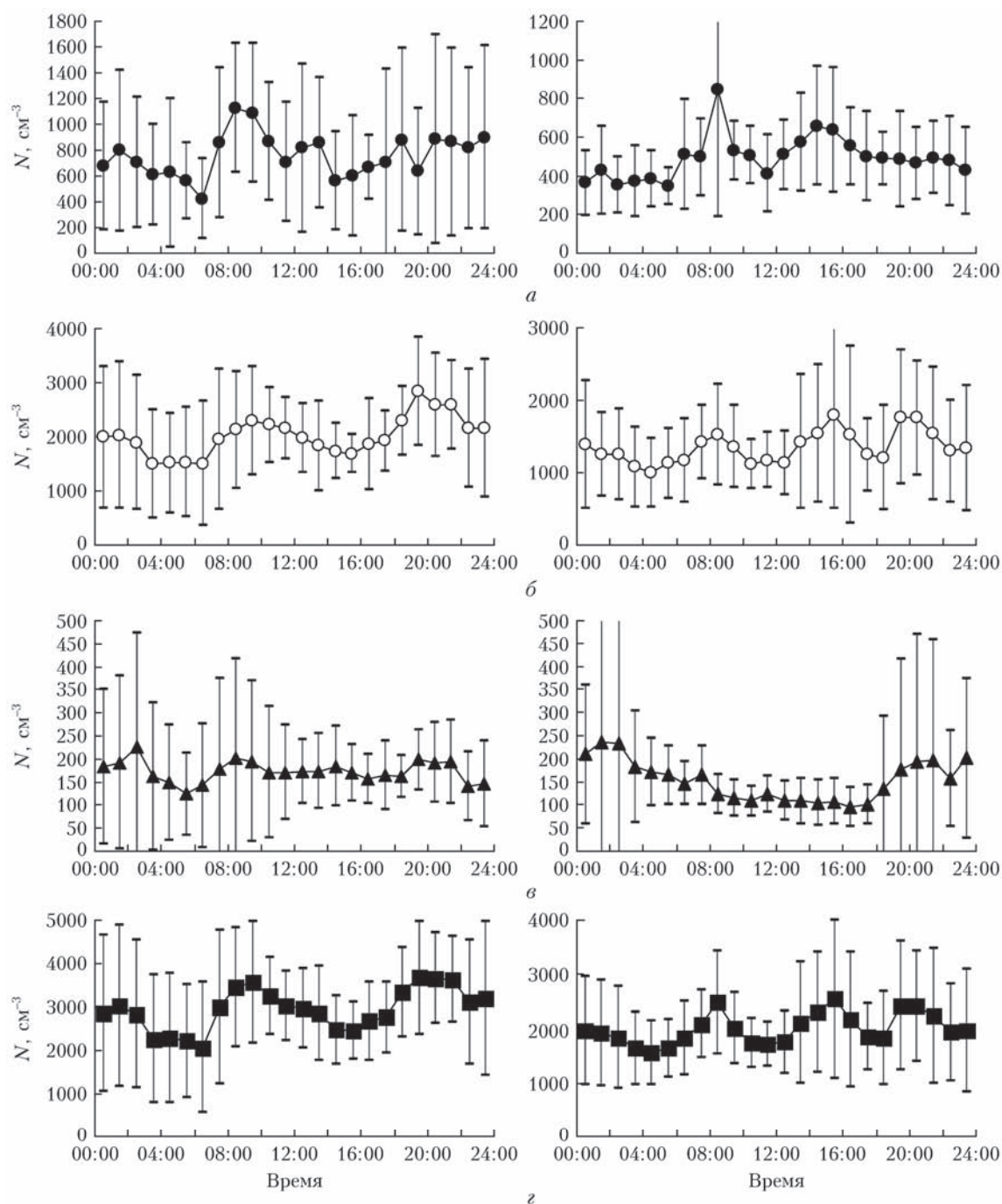


Рис. 5. Суточный ход среднечасовых значений общей счетной концентрации наночастиц (z), счетной концентрации нуклеационной моды (a), моды Айткена (b) и переходной субфракции (v), усредненный за периоды полевых кампаний 2021 (слева) и 2022 гг. (справа)

Причем характер этих флуктуаций в разные годы несколько отличался. По-видимому, днем процессы образования новых частиц за счет гомогенной нуклеации начинали конкурировать с последующими процессами гетерогенной конденсации и коагуляции, способствующими генерации частиц моды Айткена. Кроме того, возможно, оказывали влияние усиливающееся вертикальное перемешивание воздуха и суточная динамика его относительной влажности.

Как было упомянуто выше, основным источником этой моды является быстрый рост нуклеационных частиц после их образования посредством гетерогенной конденсации. Последующее преобразование частиц моды Айткена в более крупные частицы аккумуляционной фракции за счет коагуляции достаточно медленный. Поэтому мода Айткена — самая устойчивая из всех субфракций микродисперсного аэрозоля, ее частицы обладают достаточно большим временем жизни и вносят основной вклад в общую

счетную концентрацию микродисперсного аэрозоля. Этим и определяется подобие суточного хода счетной концентрации частиц моды Айткена и общей концентрации микродисперсного аэрозоля.

Во время экспериментальных исследований суточной динамики концентрации микрочастиц атмосферного аэрозоля в условиях самого жаркого и засушливого сезона сухостепной зоны юга России в дневное время были выявлены два максимума концентрации частиц моды Айткена и общей счетной концентрации в 2021 г. и три максимума в 2022 г.

Первый, утренний, максимум (в 08:00–09:00 по местному времени) регистрировался одновременно с максимумом концентрации частиц нуклеационной моды. Поскольку образование новых аэрозольных частиц за счет спонтанной нуклеации паров аэрозолеобразующих газов сопровождается их быстрой гетерогенной конденсацией и генерацией частиц моды Айткена, то после достижения ночного минимума счетные концентрации частиц нуклеационной моды и моды Айткена почти одновременно начинали расти под воздействием усиливающейся солнечной радиации, достигая своего утреннего максимума почти за равный период времени. Можно предположить, что при отсутствии иных источников генерации частиц моды Айткена прирост концентрации нуклеационных частиц был бы значительно больше прироста частиц моды Айткена.

Ранее было экспериментально установлено [11, 36–38], что образование микродисперсных частиц в атмосфере и рост их концентрации, в частности частиц моды Айткена, происходит в условиях сильно загрязненного воздуха в городах и промышленных зонах, при наличии интенсивных антропогенных источников (транспорт, промышленные выбросы). Однако в нашем случае пункт полевых наблюдений был расположен на окраине небольшого города, характеризующегося ограниченным количеством антропогенных источников малой и средней мощности. Поэтому роль антропогенного фактора в аэрозолеобразовании и росте концентрации наночастиц атмосферного аэрозоля в нашем случае не является преобладающей.

Второй ярко выраженный максимум концентрации частиц моды Айткена и общей счетной концентрации микродисперсного аэрозоля регистрировался в вечернее время. Его наличие, вероятно, определяется динамикой пограничного слоя. В вечерние часы, после возникновения температурной инверсии, происходит накопление аэрозольных частиц внутри пограничного слоя, приводящее к росту их концентрации. Размытость утреннего максимума или возникновение второго дневного максимума концентрации моды Айткена и общей счетной концентрации наночастиц главным образом связаны с суточным ходом метеорологических параметров и конкурированием процессов генерации и стока наночастиц атмосферного аэрозоля. По мере повышения температуры воздуха в дневное время интенсифицируются конвективные процессы и усиливается турбулентное перемешивание, что приводит к оттоку образо-

вавшихся частиц из приземного слоя в верхние слои атмосферы.

Наличие двух пиков (утреннего и вечернего) концентрации частиц моды Айткена характерно для суточной динамики концентрации наночастиц в атмосфере и было установлено в ходе летних полевых наблюдений в разных географических районах, например, в работах [4, 11, 15, 16, 21, 22, 38].

Суточный ход концентрации переходной субфракции частиц отличается малой амплитудой ее флуктуаций и наличием максимума в ночное время. Прирост концентрации таких наночастиц происходит за счет достаточно медленной коагуляции частиц моды Айткена, а нуклеационные и конденсационные процессы уже не играют доминирующей роли. По абсолютным значениям счетная концентрация частиц переходной субфракции почти на порядок ниже, чем концентрация частиц моды Айткена, что хорошо согласуется с данными [4, 16].

Для рядов среднечасовых значений метеорологических параметров и счетной концентрации наночастиц разных субфракций за периоды полевых наблюдений в 2021 и 2022 гг. были рассчитаны коэффициенты парной корреляции Пирсона (R) [39] (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции Пирсона (R) между среднечасовыми значениями счетной концентрации аэрозольных наночастиц различных субфракций (N , см⁻³) и метеорологических параметров в приземном воздухе

Концентрация	T , °C	P , мм рт.ст.	RH , %	WS , м/с
2021 г.				
N_{3-10}	-0,17	0,21	0,17	0,17
N_{10-100}	-0,02	-0,26	0,01	0,01
$N_{100-300}$	-0,02	-0,17	0,09	0,09
N_{3-300}	-0,09	-0,11	0,09	0,09
2022 г.				
N_{3-10}	0,19	0,01	-0,16	-0,16
N_{10-100}	0,00	0,03	-0,11	-0,11
$N_{100-300}$	-0,30	0,17	0,22	0,22
N_{3-300}	0,02	0,05	-0,11	-0,11

Проанализировано 242 пары измерений счетной концентрации наночастиц каждой из субфракций и каждого из рассматриваемых метеорологических параметров в 2021 г. и 262 пары — в 2022 г. С учетом суммы количества измерений в каждой из пар выборок для уровня значимости $p = 0,01$ критическое значение $R = 0,12$, а для $p = 0,05$ оно равно 0,09 [40].

Как видно из табл. 3, выявлены очень слабые положительные или отрицательные связи между рассмотренными парами переменных. Таким образом, несмотря на зависимость суточного хода концентраций различных субфракций наночастиц от суточной динамики метеорологических параметров, значимая корреляция между этими параметрами не установлена. По-видимому, их внутрисуточные колебания сглаживают влияния метеорологических условий на изменчивость концентрации наночастиц атмосферного аэрозоля.

2.4. Распределение аэрозольных наночастиц по размерам

Временная динамика распределения микродисперсных аэрозольных частиц по размерам подтверждает особенности суточного хода наночастиц трех субфракций во время полевых кампаний летом 2021 и 2022 гг. На рис. 6 (цв. вкладка) показана суточная изменчивость спектра распределения микродисперсных аэрозолей по размерам: суточный ход за весь период полевых кампаний 2021 и 2022 гг. (рис. 6, а, б) и межсуточный ход, усредненный за каждый день наблюдений в ходе полевых кампаний (рис. 6, в, г).

Видно, что в распределении наночастиц в разные дни и в разное время суток всегда ярко выражена мода Айткена с максимумом счетной концентрации частиц в диапазоне диаметров $13 \div 18$ нм. По форме функции распределения наночастиц по размерам в разные годы похожи. Амплитуда концентрации претерпевает изменение как во внутрисуточном, так и в межсуточном масштабе времени. В дневное время наблюдается небольшое смещение модального диаметра в сторону меньших размеров, что обусловлено главным образом влиянием суточной динамики относительной влажности воздуха: днем с уменьшением влажности интенсивность процесса конденсационного роста наночастиц снижается. Более подробно связь между относительной влажностью воздуха и положением моды Айткена рассмотрена в [4]. В течение дня происходит уширение максимума за счет увеличения концентрации более крупных частиц, а в ночное время проявляется второй, менее выраженный максимум счетной концентрации моды Айткена в диапазоне диаметров частиц $60 \div 80$ нм. Межсуточная изменчивость в спектре распределения микродисперсных аэрозолей по размерам обусловлена в основном различием метеорологических условий, оказывающих влияние на образование, трансформацию и перенос наночастиц аэрозолей.

Заключение

Результаты полевых наблюдений микродисперсных аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы сухостепной зоны юга России позволили получить первые данные о дисперсном составе и короткопериодной изменчивости счетной концентрации наночастиц трех размерных субфракций (нуклеационная мода, мода Айткена, переходная субфракция), выделенных с учетом особенностей процессов образования, роста и трансформации наночастиц.

Определена счетная концентрация наночастиц всех субфракций, характерная для летнего периода в этом регионе. Счетная концентрация частиц нуклеационной моды ($\pm$ СКО) составила 754 ± 941 см⁻³ в 2021 г. и 492 ± 508 см⁻³ в 2022 г., концентрация частиц самой стабильной моды (моды Айткена) —

2012 ± 1344 см⁻³ в 2021 г. и 1333 ± 893 см⁻³ в 2022 г., концентрация частиц переходной субфракции — 172 ± 177 см⁻³ в 2021 г. и 154 ± 171 см⁻³ в 2022 г.

Исследована суточная динамика распределения наночастиц по размерам. Установлено наличие ярко выраженной моды Айткена независимо от времени суток и метеорологических условий. Выявлено наличие минимума концентрации частиц нуклеационной моды и моды Айткена в ночные и предутренние часы, вызванного снижением процессов преобразования «газ — частица» при отсутствии фотохимической активности атмосферы и последующей гетерогенной конденсации вновь образованных частиц. Наибольшая скорость генерации нуклеационных частиц характерна для утренних часов, когда интенсифицируются фотохимические процессы, обуславливающие утренний максимум концентрации частиц нуклеационной моды и моды Айткена. В дальнейшем в течение дня из-за конкурирующих процессов гомогенной нуклеации, гетерогенной конденсации и коагуляции, а также вследствие усилившейся конвекции и связанного с ней турбулентного перемешивания наблюдается размывание утреннего максимума концентрации частиц моды Айткена, а также возникновение второго, вечернего, максимума. Рост счетной концентрации частиц переходной субфракции, связанный с коагуляцией частиц моды Айткена и зависящий от динамики пограничного слоя, происходит в темное время суток. В целом особенности короткопериодной изменчивости характеристик микродисперсного аэрозоля в сухостепной зоне юга России вписываются в общую картину суточной динамики процессов аэролеообразования и последующего роста частиц в атмосфере. Отличия связаны со спецификой метеорологических условий и локальных источников данного региона.

В настоящей работе при интерпретации первых полученных в этом географическом районе экспериментальных данных о микрофизических характеристиках наночастиц атмосферного аэрозоля мы не рассматривали возможное влияние на их динамику источников, связанных с дальним переносом, и полагали, что воздействие антропогенных факторов не является значительным. Для уточнения картины образования, роста и трансформации наночастиц аэрозолей в атмосфере сухостепной зоны юга России необходимы более длительные наблюдения и глубокий анализ их результатов.

Благодарности. Авторы выражают большую благодарность В.А. Лебеву и А.А. Хапаеву (ИФА РАН) за неоценимую помощь в подготовке и проведении натурных наблюдений за микрофизическими характеристиками наночастиц приземного аэрозоля во время полевых кампаний на Цимлянской научной станции ИФА РАН летом 2021 и 2022 гг.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 20-17-00214-П).

Список литературы

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 2nd ed. New York: Wiley, USA, 2006. 1232 p.
2. Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовецова Ю.С. Механизмы образования наноаэрозолей в тропосфере // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 10. С. 51–62. DOI: 10.7868/S0207401X1510009X.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.
4. Аршинов М.Ю. Исследование атмосферных наночастиц и их роли в формировании дисперсного состава аэрозоля: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: РГБ, 2007. 182 с.
5. Лушников А.А., Загайнов В.А., Аграновский И.Е., Любовецова Ю.С. Физико-химические процессы образования атмосферных аэрозолей // ЖФХ. 2008. Т. 82. № 10. С. 1950–1958.
6. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Лезина Е.А., Иорданский М.А. Условно-фоновый уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве и пригороде: сезонные вариации // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2023. Т. 59, № 6. С. 754–773. DOI: 10.31857/S0002351523060056.
7. Фукс Н.А., Сутугин А.Г. Высокодисперсные аэрозоли // Успехи химии. 1968. Т. XXXVII, вып. 11. С. 1965–1980.
8. Preining O. The science of ultrafine aerosols // Pure Appl. Chem. 1992. V. 64, N 11. P. 1679–1684.
9. Kulmala M., Vehkamäki H., Petäjä T., Dal Maso M., Lauri A., Kerminen V.-M., Birmili W., McMurry P.H. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: A review of observations // J. Aerosol Sci. 2004. V. 35, N 2. P. 143–176. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2003.10.003.
10. Kulmala M., Maso M.D., Mäkelä J.M., Pirjola L., Väkevä M., Aalto P., Mikkulainen P., Hämeri K., O'Dowd C.D. On the formation, growth and composition of nucleation mode particles // Tellus. 2001. V. B53. P. 479–490. DOI: 10.3402/tellusb.v53i4.16622.
11. Jose S., Mishra A.K., Lodhi N.K., Sharma S.K., Singh S. Characteristics of aerosol size distributions and new particle formation events at Delhi: An urban location in the Indo-Gangetic Plains // Front. Earth Sci. 2021. V. 9:750111. DOI: 10.3389/FEART.2021.750111.
12. Kompalli S.K., Babu S.S., Moorthy K.K., Gogoi M.M., Nair V.S., Chaubey J.P. The formation and growth of ultrafine particles in two contrasting environments: A case study // Ann. Geophys. 2014. V. 32. P. 817–830. DOI: 10.5194/angeo-32-817-2014.
13. Bulatovic I., Igel A.L., Leck C., Heintzenberg J., Riipinen I., Ekman A.M.L. The importance of Aitken mode aerosol particles for cloud sustenance in the summertime high Arctic – a simulation study supported by observational data // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 3871–3897. DOI: 10.5194/acp-21-3871-2021.
14. Lee S.H., Gordon H., Yu H., Lehtipalo K., Haley R., Li Y., Zhang R. New Particle formation in the atmosphere: From molecular clusters to global climate // J. Geophys. Res.: Atmos. 2019. V. 124, N 13. P. 7098–7146. DOI: 10.1029/2018JD029356.
15. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Сунграпова И.П., Цыдыпов В.В. Особенности суточной изменчивости микродисперсной фракции аэрозоля в атмосфере прибрежной зоны озера Байкал и аридной зоны Монголии // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 17–23. DOI: 10.15372/AOO20180103; Zayakhnov A.S., Zhamsueva G.S., Sungrapova I.P., Tsydy-pov V.V. Features of diurnal variability of ultrafine aerosol in the air of the Baikal coastal zone and arid zone of Mongolia // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 257–262. DOI: 10.1134/S1024856018030168.
16. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 11. С. 983–990.
17. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В. Фотохимическое образование микродисперсного аэрозоля в атмосфере континентального района // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 328–339.
18. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Парис Ж.-Д., Задде Г.О., Симоненков Д.В. Пространственная и временная изменчивость микродисперсной фракции аэрозоля (наночастиц) на территории Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1015–1023.
19. Khodzher T.V., Zagaynov V.A., Lushnikov A.A., Chausov V.D., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Tsydy-pov V.V., Potemkin V.L., Marinaite I.I., Maksimenko V.V., Agranovsky I.E. Study of aerosol nano- and submicron particle compositions in the atmosphere of Lake Baikal during natural fire events and their interaction with water surface // Water Air Soil Poll. 2021. V. 232. P. 266. DOI: 10.1007/s11270-021-05237-6.
20. Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T., Tsydy-pov V., Balzhanov T., Dementeva A. Studies of the dispersed composition of atmospheric aerosol and its relationship with small gas impurities in the near-water layer of Lake Baikal based on the results of ship measurements in the summer of 2020 // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 139. DOI: 10.3390/atmos13010139.
21. Sungrapova I.P., Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydy-pov V.V. Results of ultrafine aerosol measurements on the southeastern coast of Lake Baikal: St. Boyarsky // Proc. SPIE. 2020. 115606E. DOI: 10.1117/12.2575113.
22. Сунграпова И.П., Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В. Результаты исследований микродисперсного аэрозоля в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы II Всерос. науч.-практ. конф., приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования. Иркутск: ИГУ, 2019. С. 632–637.
23. Деметьева А.Л., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С. Пространственно-временные вариации мелкодисперсных фракций аэрозоля в атмосфере аридных территорий // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология северных территорий и байкальского региона: Материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск: Иркут. национ. исслед. техн. ун-т, 2017. С. 194–197.
24. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Балжанов Т.С. Исследование субмикронной фракции аэрозоля в атмосфере пустыни Гоби // Вестн. ВСГУТУ. 2015. Т. 52, № 1. С. 10–12.
25. Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М., Иорданский М.А., Максименков Л.О., Артамонова М.С. Многолетняя изменчивость состава приземного аэрозоля в опустыненных и засушливых зонах юга России // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 456–464. DOI: 10.15372/AOO20220604; Gubanova D.P., Chkhetiani O.G., Kuderina T.M., Iordanskii M.A., Maksimenkov L.O., Artamonova M.S. Long-term variability of the composition of near-surface aerosol over desertified and arid zones in southern Russia // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 6. P. 680–690. DOI: 10.1134/S1024856022060148.

26. Валиулин С.В., Бакланов А.М., Дубцов С.Н., Миточенко В.Г., Моисеенко П.П., Онищук А.А. Диффузионный спектрометр аэрозоля для измерения распределения по размерам и концентрации нано- и субмикронных частиц // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 145–146. DOI: 10.1134/S0032816219010269.
27. Dubtsov S., Ovchinnikova T., Valiulin S., Chen X., Manninen H.E., Aalto P.P., Petäjä T. Laboratory verification of Aerosol Diffusion Spectrometer and the application to ambient measurements of new particle formation // J. Aerosol Sci. 2017. V. 105. P. 10–23. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2016.10.015.
28. Onischuk A.A., Valiulin S.V., Baklanov A.M., Moiseenko P.P., Mitrochenko V.G. Determination of the aerosol particle size distribution by means of the diffusion battery: Analytical inversion // Aerosol Sci. Tech. 2018. V. 5, N 8. P. 841–853. DOI: 10.1080/02786826.2017.1387642.
29. Метеостанция кабельная DAVIS Instruments Vantage Pro2 6152CEU. URL: <https://davis-meteo.ru/product/6152ceu/> (дата обращения: 15.01.2024).
30. WeatherArchive.ru. URL: <https://weatherarchive.ru/Temperature/Tsimlyansk/August-2021> (дата обращения: 24.01.2024).
31. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2015. V. 96. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
32. ARL NOAA. HYSPLIT Trajectory Model. URL: www.arl.noaa.gov (дата обращения: 04.12.2023).
33. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Летние климатические изменения на юге Европейской России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 107–121. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.
34. Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О., Иорданский М.А. Массовый и элементный состав приземного аэрозоля различных размерных фракций в опустыненных и засушливых районах юга России // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 88–98.
35. Жидкова А.Ю., Ковярова В.А. Ростовская область – зона климатической уязвимости // Вестн. Таганрогского института им. А.П. Чехова. 2020. № 2. С. 124–129.
36. Wang Z., Wu Z., Yue D., Shang D., Guo S., Sun J., Ding A., Wang L., Jiang J., Guo H., Gao J., Cheung H.C., Morawska L., Keywood M., Hu M. New particle formation in China: Current knowledge and further directions // Sci. Total Environ. 2017. V. 577. P. 258–266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.177.
37. Young L.H., Keeler G.J. Summertime ultrafine particles in urban and industrial air: Aitken and nucleation mode particle events // Aerosol Air Qual. Res. 2007. V. 7. P. 379–402.
38. Dinoli A., Conte M., Grasso F.M., Contini D. Long-term characterization of submicron atmospheric particles in an urban background site in southern Italy // Atmosphere. 2020. V. 11, N 4. P. 334. DOI: 10.3390/atmos11040334.
39. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.
40. Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных: учеб. пособие. СПб.: Речь, 2007. 392 с.

D.P. Gubanova, O.G. Chkhetiani, L.O. Maksimenkov. Short-period variations in microphysical characteristics of aerosol nanoparticles in the dry steppe zone of southern Russia in summer.

The first results of summer field observations of the microphysical characteristics of ultrafine aerosol particles in the near-surface layer of the atmosphere in the dry steppe zone of southern Russia in 2021 and 2022 are considered. Taking into account the synoptic and meteorological conditions, the daily changes in concentration and size distribution of ultrafine aerosols, as well as their short-term variability are studied. The constant presence of Aitken particles is established at any time of the day and under any meteorological conditions. Minimal concentrations of nucleation particles and Aitken particles are detected at night and in the early morning. The highest rate of generation of nucleation particles is typical for the morning hours, when photochemical processes are activated, thus causing the morning maxima of concentrations of nucleation and Aitken particles. During the night hours, an increase in the concentration of transient subfraction particles is observed. The features of the short-period variability of ultrafine aerosols in the dry steppe zone of southern Russia are discussed taking into account the general pattern of daily aerosol generation dynamics and subsequent particle growth in the atmosphere, as well as by comparing with the results of observations of ultrafine aerosols in some other regions of the world.

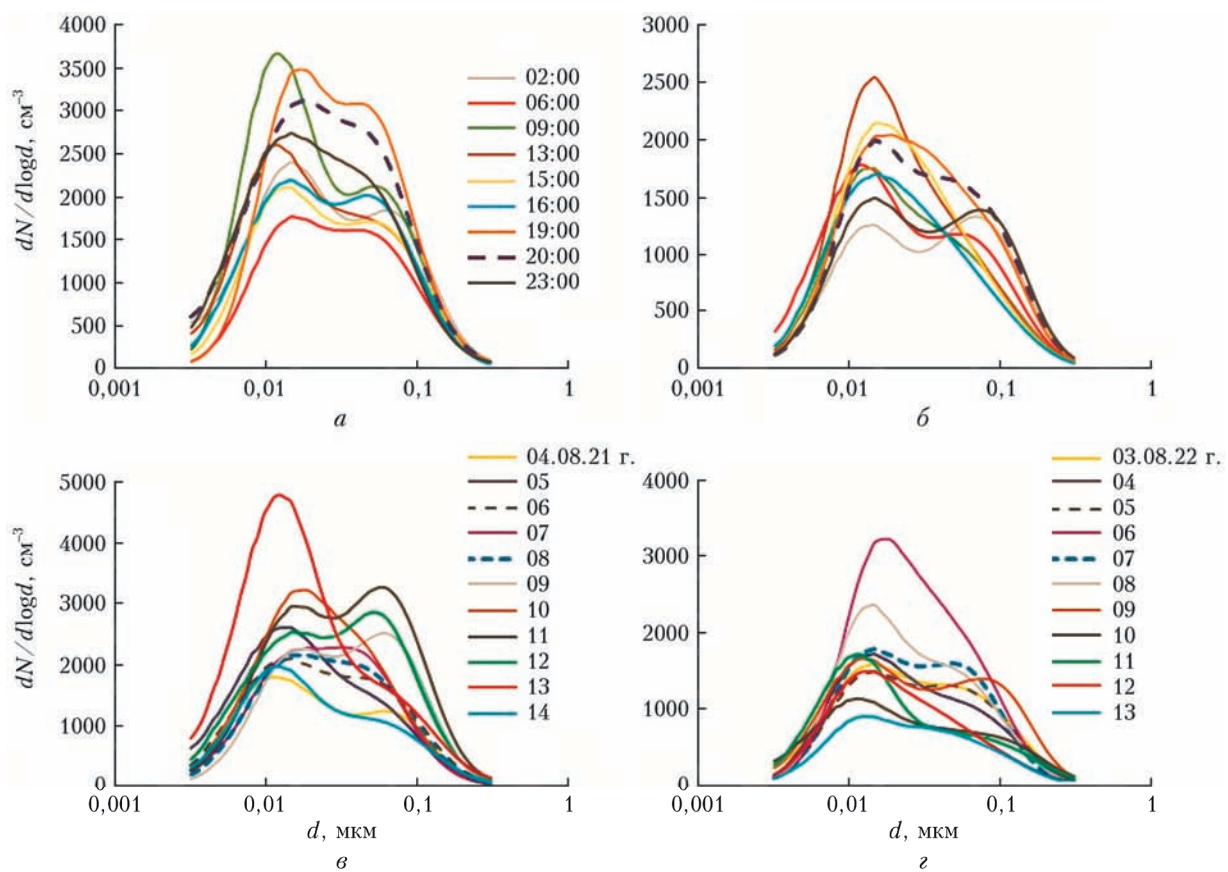


Рис. 6. Распределение по размерам микродисперсных аэрозольных частиц в августе 2021 (слева) и 2022 гг. (справа): *а, б* — средний суточный ход за весь период полевой кампании; *в, г* — среднесуточное распределение по размерам по дням полевой кампании