

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

## Распределение по размерам «сухой основы» частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г. Томска в рамках эмпирической классификации типов «аэрозольной погоды»

М.В. Панченко, В.В. Польшкин, Вас.В. Польшкин, В.С. Козлов,  
Е.П. Яушева, В.П. Шмаргунов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

В работе на основе комплексного мониторинга характеристик аэрозоля в пригородном районе г. Томска (2000–2017 гг.) предложена версия классификации состояний приземного слоя атмосферы по типам «аэрозольной погоды». В основу используемого нами метода измерений заложен принцип раздельного изучения процессов изменчивости «сухой основы» частиц и их конденсационной активности.

Выделение соответствующих типов «аэрозольной погоды» осуществлено в координатах ( $\sigma_d$ ;  $P$ ), где  $\sigma_d$  – коэффициент рассеяния сухой основы аэрозоля ( $\lambda = 0,51$  мкм);  $P$  – отношение массовой концентрации поглощающего вещества к массовой концентрации субмикронных частиц, отражающее степень «почернения» частиц. Массив данных по величине коэффициента рассеяния  $\sigma_d = 100$  Мм<sup>-1</sup> разделен на два класса: «атмосферные дымки» ( $\sigma_d < 100$  Мм<sup>-1</sup>) и «мгла» ( $\sigma_d > 100$  Мм<sup>-1</sup>). Далее разделение массива наблюдательных данных осуществлено по уровню значения  $P = 0,05$ . В каждом календарном сезоне в соответствии с заданными параметрами выделены четыре типа «аэрозольной погоды», которые условно обозначены как «фон» –  $P < 0,05$ ,  $\sigma_d < 100$  Мм<sup>-1</sup>; «дымка-S» –  $P > 0,05$ ,  $\sigma_d < 100$  Мм<sup>-1</sup>; «смог» –  $P > 0,05$ ,  $\sigma_d > 100$  Мм<sup>-1</sup>; «дымная мгла» –  $P < 0,05$ ,  $\sigma_d > 100$  Мм<sup>-1</sup>.

Показано, что во все сезоны года по соотношению содержания субмикронных и грубодисперсных частиц основные типы «аэрозольной погоды» достоверно различны.

*Ключевые слова:* аэрозоль, микроструктура, коэффициент рассеяния, ореол, сажа, субмикронная и грубодисперсная фракции, «сухая основа» частиц, «фон», «дымка», «смог», «дымная мгла»; aerosol, microstructure, scattering coefficient, halo, soot, submicron and coarse dispersed fractions, “dry basis” of particles, “background”, “haze”, “smog”, “smoke haze”.

### Введение

К концу XX в. был получен большой объем сведений о характеристиках аэрозоля и основных процессах его образования и трансформации практически во всем диапазоне высот, где присутствие частиц сказывается на свойствах атмосферы [1–10]. На этом этапе основной объем информации относился к рассеивающим свойствам частиц, и гораздо меньше было известно об аэрозольном поглощении главным образом из-за отсутствия соответствующих приборов. На рубеже веков, в связи с климатическими изменениями, пришло понимание того, что аэрозоль играет очень важную и неоднозначную роль в формировании радиационного режима планеты.

Не случайно, по заключению Межправительственной группы по изучению изменений климата (IPCC) [11], наиболее низкий уровень знаний и научного понимания относится именно к оценке вклада рассеивающих и поглощающих свойств аэрозоля в радиационный баланс. Проблемы, связанные с постоянно усиливающимся загрязнением атмосферы и его влиянием на геосферно-биосферные процессы, не могут быть решены без детальных сведений о микрофизических характеристиках атмосферных частиц в различных пространственных масштабах (от локального до глобального) (например, [12–17]). Анализ реалистичности задач, поставленных соглашениями, принятыми на Парижской конференции по климату (COP) 2015 г., заставил научное сообщество усилить внимание к организации наблюдений и интерпретации получаемых данных [18]. В связи с этим наиболее остро выделена необходимость мониторинговых измерений, развития прогностических моделей, их верификации по циклу «глобальный – региональный – локальный уровень».

\* Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Василий Викторович Польшкин (rv@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Елена Петровна Яушева (helen@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

и обратно». Действительно, как бы ни были совершенны численные методы, в конечном счете качество моделей будет определяться обеспеченностью данными регулярных инструментальных наблюдений, выбором входных параметров и оптимальной параметризации их связи с внешними факторами. На наш взгляд, особые проблемы возникают при разработке подобных моделей на региональном уровне для приземного слоя атмосферы, где состав аэрозоля формируется наиболее сложным образом под воздействием погодных условий, из различных природных и антропогенных источников.

Наиболее важную роль в развитии аэрозольной проблематики сыграли идеи и работы Г.В. Розенберга [1, 6]. На основе анализа совокупности всех известных в то время данных и результатов новаторских экспериментов по исследованию матриц рассеяния света, полученных его коллективом (например, [19–21]), Г.В. Розенберг обосновал существование в атмосфере различных типов «оптической погоды». На этом этапе была выявлена важная роль относительной влажности воздуха в изменчивости оптического состояния атмосферы [22, 23] и создан ряд моделей оптических характеристик для длин волн видимой области спектра [24–26]. Благодаря сведениям о микрофизических параметрах, полученным в результате обращения оптических характеристик, стала понятна роль изменения содержания сухого вещества в составе аэрозольных частиц [27]. Разработкой малопараметрических моделей и их микрофизической интерпретацией, на наш взгляд, был завершен один из важных и плодотворных этапов в изучении атмосферного аэрозоля (условно назовем его этапом оптических наблюдений *in situ*).

Настоящая работа посвящена анализу результатов мониторинговых измерений микроструктурных характеристик субмикронного и грубодисперсного аэрозоля в приземном слое атмосферы пригородно-района г. Томска в 2000–2017 гг.

## Аппаратура и методы

Используемая аппаратура и подход к комплексным исследованиям атмосферного аэрозоля ранее подробно описаны в [28], здесь ограничимся их кратким описанием. Все параметры измерялись в мониторинговом режиме с периодичностью 1 ч автоматизированным аэрозольным комплексом, состоящим из модифицированного нефелометра ФАН [29], фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-5 или ПКГТА [30], аэталометра [31] и фотометра закрытого объема для круглосуточного измерения ореольной индикатрисы рассеяния  $I(\varphi = 1,2 \div 20^\circ)$ , где  $\varphi$  – угол рассеяния [32]. Текущие данные мониторинга на Аэрозольной станции ИОА СО РАН доступны на сайте <http://aerosol.iao.ru>.

Для каждого типа «оптической погоды» наиболее важную роль играет относительная влажность воздуха, существенно изменяющая оптические характеристики аэрозоля даже в суточном цикле. Ос-

новываясь на этом, для нового цикла исследований «жизни» аэрозоля в атмосфере в основу развиваемого нами метода «активной нефелометрии» был положен принцип *раздельного* изучения процессов изменчивости «сухой основы» частиц и их *конденсационной активности* [33].

Целесообразность такого подхода в следующем: состояние аэрозоля зависит от множества факторов – мощности источников и пропускной способности стоков, видоизменений от появления до ухода из атмосферы. И для того, чтобы подчеркнуть, что в этой работе рассматривается версия классификации аэрозольных характеристик, сформированных в результате всех этих процессов, нами используется понятие «аэрозольная погода» – состояние аэрозоля в данное время в конкретном месте наблюдения, которое может быть представлено как совокупность его базовых характеристик: концентрации, химического состава, функции распределения частиц по размерам, фактора роста и т.д. (*Понятно, что при оптических измерениях в реальной атмосфере это «оптическая погода»*).

Для измерения оптических и микрофизических характеристик «сухой основы» аэрозоля в мониторинговом режиме забор анализируемого воздуха осуществляется непосредственно из атмосферы *in situ*. Перед поступлением в прибор воздух искусственно осушается путем подогрева на  $20^\circ$ . Нагрев обеспечивает снижение относительной влажности воздуха до  $RH = 20\text{--}30\%$  [33], что позволяет рассматривать все измеряемые характеристики как относительно «сухие» (не путать с «обезвоженными» [6, 10]).

Прежде чем перейти к описанию типов «аэрозольной погоды», сделаем ряд важных методических пояснений: 1) для того чтобы полностью исключить влияние относительной влажности воздуха, которая имеет хорошо выраженный суточный ход [34, 35], на трансформацию «сухого» вещества [27], дальнейший анализ проводится для среднесуточных значений анализируемых величин; 2) в мониторинговом режиме нефелометр измеряет коэффициент направленного рассеяния «сухой основы» субмикронных частиц  $\mu_d(\varphi = 45^\circ)$  ( $\text{Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ) на длине волны 0,51 мкм, а оценка объемного коэффициента рассеяния проводится по эмпирическому соотношению  $\sigma_d = 7,3\mu_d(45^\circ)$  ( $\text{Мм}^{-1}$ ) [24]; 3) для удобства исследователей, которые изучают аэрозольные процессы не оптическими методами (например, гравиметрией и т.п.), осуществляется оценка массовой концентрации субмикронного аэрозоля  $M_A$  ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) =  $2,4\mu_d(45^\circ)$  (для плотности частиц  $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ); 4) аэталометр проводит измерение поглощения излучения на трех длинах волн (0,46, 0,53 и 0,63 мкм), но, поскольку калибровка прибора осуществлена с применением сажевых частиц, данные измерений приводятся к эквиваленту массовой концентрации сажи –  $M_{\text{ВСeq}}$  ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) [36]. На основе полученных величин  $M_A$  и  $M_{\text{ВСeq}}$  вычисляется значение относительного содержания сажи в частицах  $P = M_{\text{ВСeq}}/M_A$ .

## Выбор эмпирических параметров классификации типов «аэрозольной погоды»

Ориентируясь на базовые основы однопараметрических моделей приземных дымок [22, 24–27], в которых входным параметром является коэффициент рассеяния, в качестве первого параметра для нашей классификации выбрано значение коэффициента рассеяния  $\sigma_d = 100 \text{ Мм}^{-1}$  (с учетом влияния влажности метеорологическая дальность видимости  $S_m \sim 8\text{--}10 \text{ км}$ ). Таким образом, весь массив данных по оси абсцисс (рис. 1) делится на два класса: «атмосферные дымки» ( $\sigma_d < 100 \text{ Мм}^{-1}$ ) и «мгла» ( $\sigma_d > 100 \text{ Мм}^{-1}$ ). По определению тип оптической погоды «мгла» обусловлен внедрением в атмосферу сторонних примесей: пылевых облаков, дыма лесных пожаров или промышленных объектов, продуктов вулканической деятельности и т.п. [6].

Учитывая, что «сухая основа» непоглощающих и поглощающих субмикронных частиц формируется из паров аэрозолеобразующих соединений (ПАОС) разной природы, из разных источников и с разным временем жизни в атмосфере, в качестве второго параметра для классификации необходимо было выбрать

характеристику, которая отражает степень «почернения» частиц.

Проведенный ранее анализ модельных экспериментов в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН [36] по исследованию рассеивающих и поглощающих свойств аэрозоля при разных режимах горения, а также данных, полученных в приземном слое атмосферы, позволил обосновать использование для этой цели относительное содержание сажи  $P$ . Показано, что на фоне всего многообразия состояний приземного аэрозоля  $P$  обеспечивает выделение ситуаций (по уровню  $P \leq 0,045\text{--}0,05$ ), отягощенных воздействием удаленных от точки наблюдения лесных пожаров [36]. Поэтому было предложено осуществить разбиение массива данных по оси ординат на уровне значения  $P = 0,05$ .

## Типы «аэрозольной погоды» (по данным многолетних измерений в приземном слое атмосферы пригородной зоны г. Томска)

На основе измерений 2000–2017 гг. (всего 6569 сут) для четырех календарных сезонов года

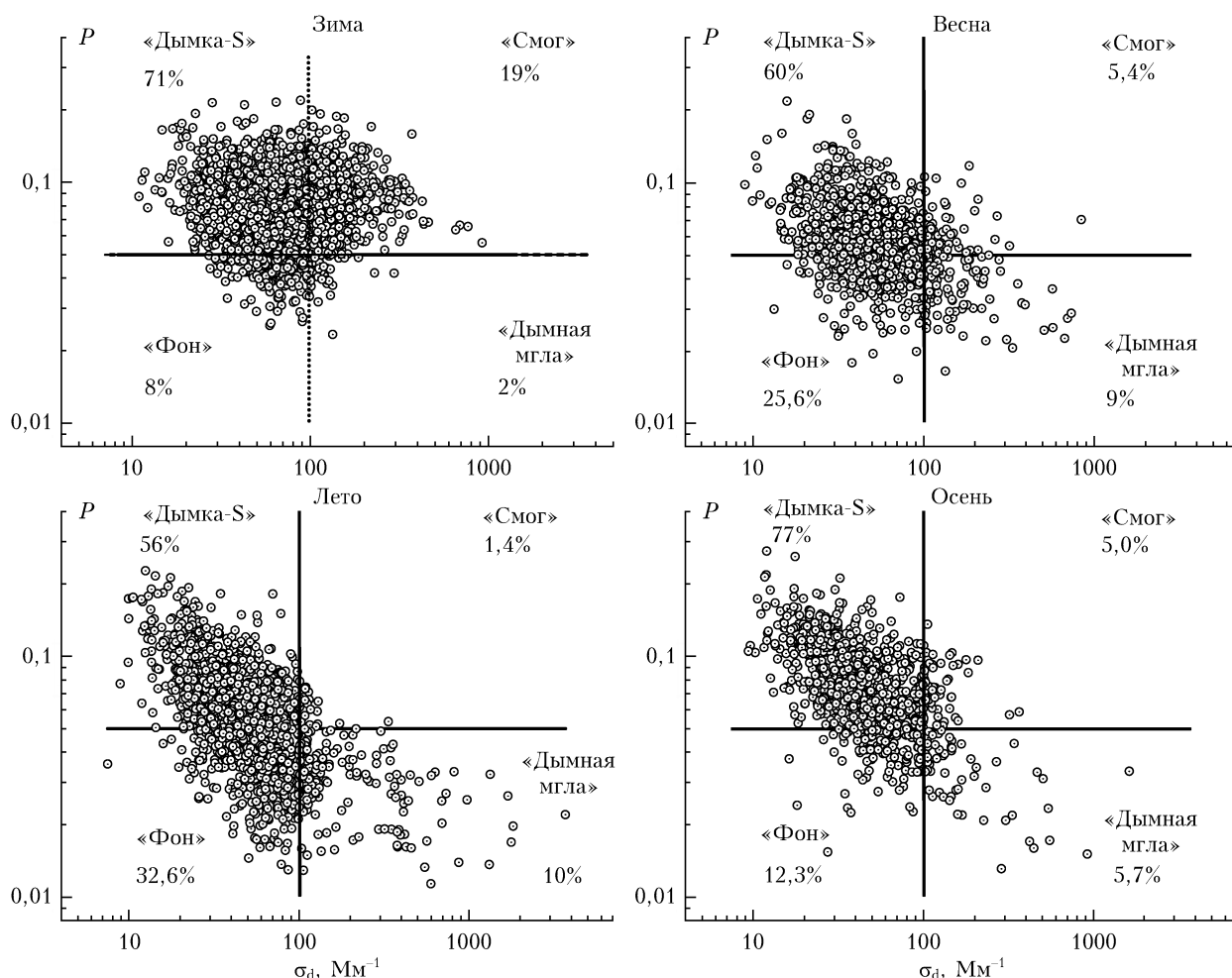


Рис. 1. Распределение среднесуточных значений характеристик «сухой основы» аэрозоля на диаграмме ( $\sigma_d$ ;  $P$ )

была сформирована диаграмма распределения среднесуточных значений коэффициента аэрозольного рассеяния  $\sigma_d$  и относительного содержания «сажи»  $P = M_{\text{Всeq}}/M_A$  (см. рис. 1).

В каждом сезоне в соответствии с заданными параметрами были выделены четыре типа «аэрозольной погоды», для краткости условно обозначенные как «фон» ( $P < 0,05$ ,  $\sigma_d < 100 \text{ Мм}^{-1}$ ), «дымка-S» ( $P > 0,05$ ,  $\sigma_d < 100 \text{ Мм}^{-1}$ ), «смог» ( $P > 0,05$ ,  $\sigma_d > 100 \text{ Мм}^{-1}$ ), «дымная мгла» ( $P < 0,05$ ,  $\sigma_d > 100 \text{ Мм}^{-1}$ ). Тип «дымка-S» — «пригородная дымка» — учитывает вклад городских загрязнений в среднесуточные реализации [37], так как рассматриваемые нами характеристики получены в пригородном районе г. Томска.

На рис. 1 для каждого сезона указан долевым вклад (в процентах) среднесуточных реализаций соответствующего типа «аэрозольной погоды» в полном массиве данных.

В течение года в 86% случаев наблюдается состояние «аэрозольной погоды» класса «атмосферных дымок». Из них к предлагаемому нами типу «дымка-S» в году относятся 66% (зимой — 71%, весной — 60%, летом — 56% и осенью — 77%), а к типу «фон» — 20% (зимой — 8%, весной — 26%, летом — 33% и осенью — 12%).

Несмотря на простоту наших критериев выделения типов «аэрозольной погоды» в координатах ( $\sigma_d$ ;  $P$ ), можно отметить, что уже на начальном этапе видна перспективность такого подхода. На рис. 1 показано, что смоговые ситуации с большим содержанием поглощающего вещества и с высокой общей концентрацией частиц наиболее часто наблюдаются зимой (19%), в меньшей степени весной и осенью и практически отсутствуют в летний период (1,4%). Такая статистика появления смоговых ситуаций вполне объяснима формированием в холодный период сильных приземных инверсий, способствующих накоплению примесей в приземном слое атмосферы города, а длительное выхолаживание (в темное время суток) определяет увеличение концентрации и распространение «шапки загрязнений» в пригородную зону [37]. И наоборот, тип погоды «дымная мгла» практически не наблюдается в зимний период, но максимально часто реализуется в летних условиях (10%).

## О соотношении концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц

На рис. 2 для каждого календарного сезона приведены средние значения функции объемного распределения частиц аэрозоля по размерам  $dV/dr$  для разных типов «аэрозольной погоды». Поскольку в качестве первого параметра классификации выбрано граничное значение коэффициента рассеяния  $\sigma_d = 100 \text{ Мм}^{-1}$ , по всему спектру размеров видны различия концентраций субмикронной и грубодис-

персной фракций между классами «оптической погоды» «атмосферные дымки» и «мгла».

Отметим, что вблизи границ типов на диаграмме ( $\sigma_d$ ;  $P$ ) достоверность классификации снижается, но, как уже отмечалось, количество неоднозначно интерпретируемых реализаций относительно невелико (частота их появления 2% и менее). Зимой это — «дымная мгла», летом — «смог». Эта неоднозначность может определяться некоторым несовершенством нашего выбора границы раздела по оси абсцисс при значении  $\sigma_d = 100 \text{ Мм}^{-1}$ . В то же время появление этих типов «аэрозольной погоды» вполне объяснимо: в зимний период в условиях существования «фоновой» погоды ( $P < 0,05$ ) в пункт наблюдения поступает определенное количество дымового аэрозоля от удаленных поселков, где используется печное отопление; летом увеличение  $\sigma_d$  и  $P$  может быть связано с определенным вкладом городского загрязнения атмосферы в среднесуточные значения анализируемых характеристик [37].

Учитывая, что классификацию типов «аэрозольной погоды» только в координатах ( $\sigma_d$ ;  $P$ ) вряд ли целесообразно использовать для детального анализа функций распределения, в этой работе рассматривается только соотношение  $N_f/N_c$  интегральных концентраций частиц двух фракций — субмикронной  $N_f$  ( $r = 0,2 \div 0,5 \text{ мкм}$ ) и грубодисперсной  $N_c$  ( $r > 0,5 \text{ мкм}$ ).

Напомним, что измерение функции распределения частиц по размерам с помощью фотоэлектрических счетчиков ограничено диапазоном  $r = 0,2 \div 6 \text{ мкм}$  (см. рис. 2). Неизбежны погрешности определения концентрации в районе нижней границы диапазона размеров частиц, измеряемых счетчиком, из-за вариаций комплексного показателя преломления частиц [38]. У верхней границы вероятно занижение значений концентрации из-за определенной потери крупных частиц в процессе забора пробы и их транспортировки в измеритель и главным образом из-за небольшого объема прокачиваемого воздуха в каждом часовом цикле (около 10 л).

В свою очередь, при измерении коэффициентов направленного рассеяния в области ореола таких проблем практически нет, поскольку, во-первых, объем прокачиваемого воздуха на несколько порядков больше (около  $10 \text{ м}^3$ ), а во-вторых, диапазон углов  $\varphi = 1,2 \div 20^\circ$  обеспечивает информацию о размерах частиц от нескольких сотых до  $10 \div 15 \text{ мкм}$  [6, 39, 40]. Но для восстановления функции распределения в диапазоне субмикронных частиц на основе этих измерений уже необходимо априорное задание комплексного показателя преломления, что является отдельной, нетривиальной задачей.

Располагая результатами длительных измерений коэффициентов направленного рассеяния в области ореольной части индикатрисы рассеяния (2010–2017 гг.), рассмотрим соотношение  $I(\varphi)/I(\varphi = 1,2^\circ)$  (рис. 3), где  $I(\varphi)$  — значение коэффициента рассеяния в диапазоне углов  $\varphi = 1,2 \div 20^\circ$ . Видно, что во все сезоны года различия между типами «аэрозольной

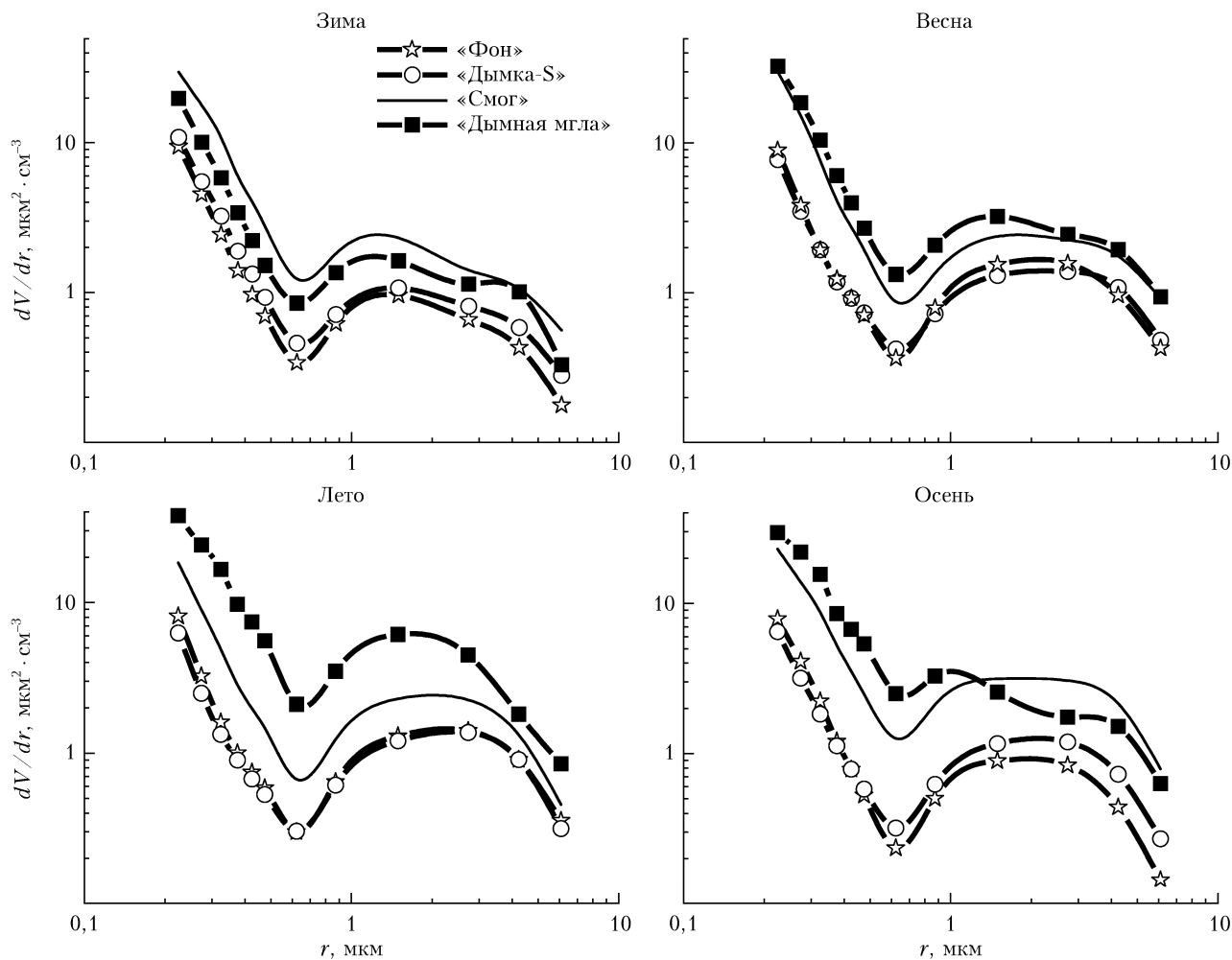


Рис. 2. Функция распределения частиц аэрозоля по объемам  $dV/dr$  для разных типов «аэрозольной погоды»

погоды» максимальны при угле рассеяния  $20^\circ$ , следовательно, для оценки соотношения концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц можно воспользоваться параметром  $I_{20}/I_{1,2}$ , где  $I_{20}$  — значение коэффициента рассеяния для угла рассеяния  $\varphi = 20^\circ$ ;  $I_{1,2}$  — для  $\varphi = 1, 2^\circ$ .

В табл. 1 приведены средние значения и среднеквадратичные отклонения (СКО) параметров  $I_{20}/I_{1,2}$  и  $N_f/N_c$  для всех массивов.

Из сравнения параметров  $I_{20}/I_{1,2}$  и  $N_f/N_c$  (табл. 1) видно, что характер их изменения в разных типах «аэрозольной погоды» вполне согласуется друг с другом. Более наглядно это следует из корреляционной диаграммы, приведенной на рис. 4.

Анализируя  $I_{20}/I_{1,2}$  (см. рис. 3), можно сделать вывод, что во все сезоны года минимальное отношение концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц наблюдается для типов «аэрозольной погоды» «дымка-S» и «фон», максимальное — зимой и весной для «смога», а летом и осенью — для «дымной мглы».

В табл. 2 приведены результаты оценки достоверности различий типов «аэрозольной погоды» в каждом календарном сезоне года. За исключением

массивов данных, которые редко встречались в наших измерениях (в табл. 2 приведен процент событий), видно, что во все сезоны года по соотношению содержания субмикронных и грубодисперсных частиц основные типы «аэрозольной погоды» достоверно различны.

Следует отметить, что средние значения параметров  $N_f/N_c$  и  $I_{20}/I_{1,2}$  в каждом сезоне для «фоновых» массивов больше, чем для «дымки-S». Из этой закономерности выпадает только параметр  $N_f/N_c$  для зимы (см. табл. 1), что может быть обусловлено проблемами определения концентрации субмикронных частиц на нижней границе диапазона измерений счетчика. Оценивая эту особенность, можно предположить, что в наиболее «чистых» условиях ( $P < 0,05$ ) на фоне локальных источников грубодисперсного аэрозоля наблюдается ситуация зарождения и развития субмикронных частиц [6]. Тип «аэрозольной погоды», названный нами «дымка-S», по-видимому, имеет большее время жизни в атмосфере, поскольку формируется на значительной территории, разными источниками, в том числе городскими загрязнениями («смог»). Следовательно, приходящая в пункт наблюдения воздушная масса

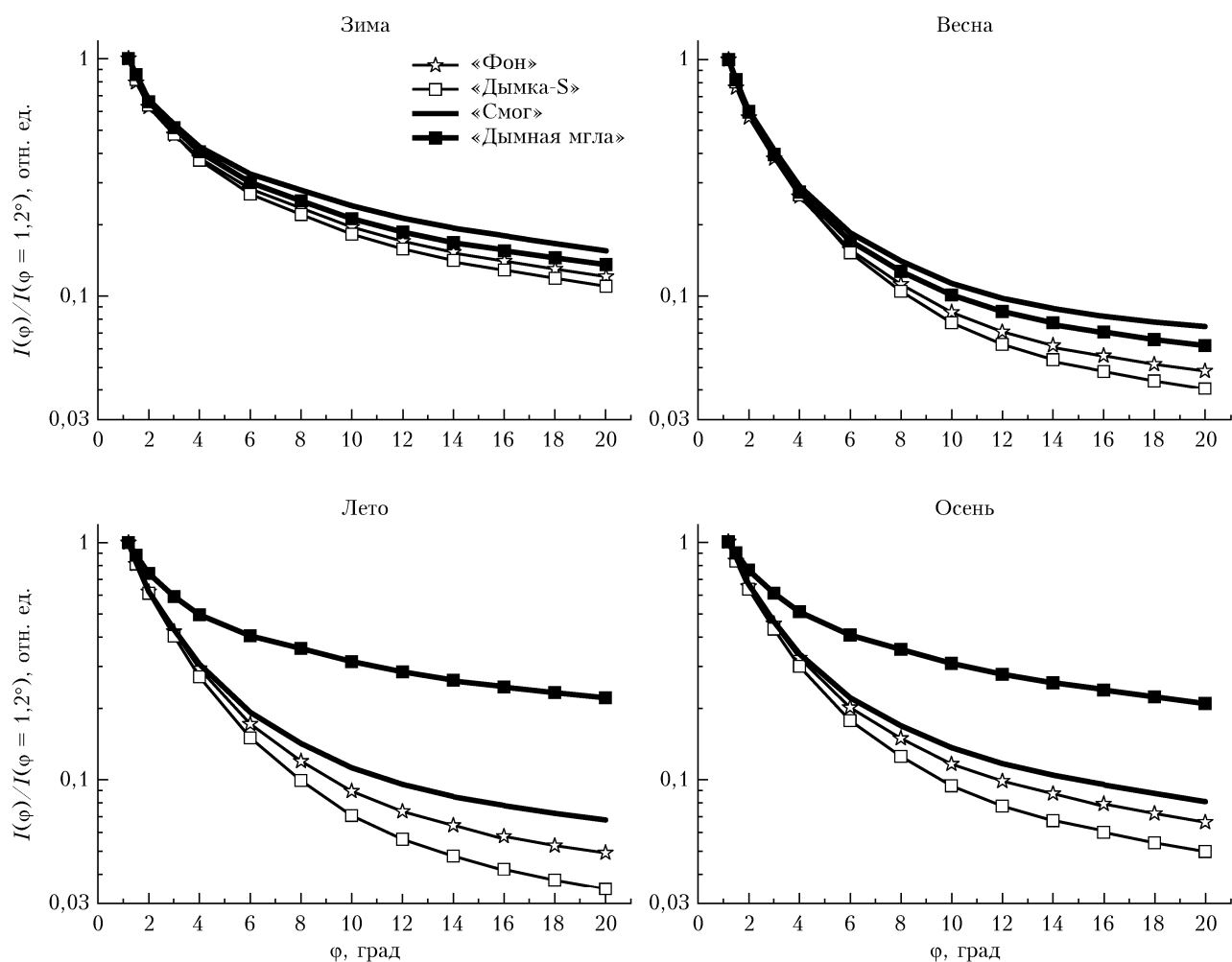


Рис. 3. Среднее значение нормированного коэффициента направленного рассеяния  $I(\varphi)/I(\varphi = 1,2^\circ)$  в области ореола для разных типов «аэрозольной погоды»

Таблица 1

Средние значения  $\pm$  СКО параметров  $I_{20}/I_{1,2}$  и  $N_f/N_c$  для разных сезонов года и типов «аэрозольной погоды»

Сезон	Тип «аэрозольной погоды»			
	«Фон»	«Дымка-S»	«Смог»	«Дымная мгла»
	$I_{20}/I_{1,2}$			
Зима	0,150 $\pm$ 0,068	0,135 $\pm$ 0,061	0,167 $\pm$ 0,047	0,154 $\pm$ 0,062
Весна	0,068 $\pm$ 0,050	0,056 $\pm$ 0,040	0,114 $\pm$ 0,072	0,116 $\pm$ 0,107
Лето	0,053 $\pm$ 0,023	0,039 $\pm$ 0,016	0,068 $\pm$ 0,047	0,172 $\pm$ 0,106
Осень	0,078 $\pm$ 0,035	0,066 $\pm$ 0,044	0,101 $\pm$ 0,078	0,190 $\pm$ 0,078
	$N_f/N_c$			
Зима	108 $\pm$ 86	117 $\pm$ 128	131 $\pm$ 115	107 $\pm$ 45
Весна	68 $\pm$ 50	64 $\pm$ 51	100 $\pm$ 43	97 $\pm$ 57
Лето	60 $\pm$ 39	48 $\pm$ 34	71 $\pm$ 33	93 $\pm$ 48
Осень	83 $\pm$ 70	75 $\pm$ 65	78 $\pm$ 59	96 $\pm$ 72

Таблица 2

Оценка  $t$  достоверности различий по параметру  $I_{20}/I_{1,2}$  разных типов «аэрозольной погоды» (✓ – достоверно различны с вероятностью более 0,95%; × – вероятность отличия менее 0,95%)

$I_{20}/I_{1,2}$	«Фон»/ «дымка-S»	«Фон»/ «смог»	«Фон»/ «дымная мгла»	«Дымка-S»/ «смог»	«Смог»/ «дымная мгла»	«Дымка-S»/ «дымная мгла»
Зима	✓	✓	× (2%)	✓	× (2%)	× (2%)
Весна	✓	✓	✓	✓	× (5,4%)	✓
Лето	✓	× (1,4%)	✓	✓	✓	✓
Осень	✓*	× (5%)	✓	✓	✓	✓

\* Достоверно различны с вероятностью 0,92%.

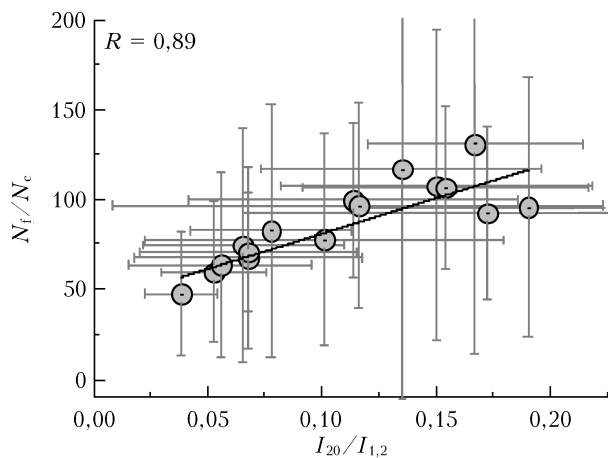


Рис. 4. Корреляционная связь между параметрами  $N_f/N_c$  и  $I_{20}/I_{1,2}$  для разных типов «аэрозольной погоды» во все сезоны

в большей степени наполнена как «сажей», так и частицами грубодисперсной фракции. В случае ситуаций «смог» и «дымная мгла», которые существенно увеличивают концентрацию аэрозоля [6], и в первую очередь субмикронной фракции, понятно, что большинство источников частиц связаны с процессами горения и фотохимическими превращениями газ-частица [36, 37].

### Заключение

По результатам комплексных многолетних измерений аэрозольных характеристик в приземном слое атмосферы пригородного района г. Томска в нашей работе обсуждается первая версия классификации типов «аэрозольной погоды». Развивая подход раздельного измерения оптических характеристик «сухой основы» аэрозольных частиц и их конденсационной активности, в качестве первого параметра мы выбрали величину коэффициента рассеяния «сухой основы» аэрозоля  $\sigma_d$  ( $\lambda = 0,51$  мкм), а в качестве второго – отношение массовой концентрации поглощающего вещества к массовой концентрации субмикронных частиц  $P$ .

Возможность применения подобного подхода ранее была доказана при выделении состояний атмо-

сферы приземного слоя, отягощенных воздействием удаленных лесных пожаров [36].

Массив данных наблюдений для каждого сезона был распределен в координатах ( $\sigma_d$ ;  $P$ ) на четыре типа «аэрозольной погоды» – «фон», «дымка-S», «смог» и «дымная мгла».

Показано, что, за исключением редко реализуемых массивов данных, во все сезоны года по соотношению содержания субмикронных и грубодисперсных частиц основные типы «аэрозольной погоды» достоверно различны. Рассматривая данную классификацию как первый этап, отметим, что для дальнейшего развития понадобится привлечение результатов измерения функции распределения частиц и сажи по размерам, гигроскопических и термооптических характеристик и т.д. Учет суточного хода  $\sigma_d$  и концентрации поглощающего вещества позволит корректно определить соотношение процессов регионального масштаба и влияния города. А последующее сопоставление с подобным анализом результатов наших измерений в фоновом районе даст возможность обосновать набор параметров при создании региональной модели для расчета радиационно-значимых характеристик.

Многолетние исследования выполнялись в рамках государственного задания по проекту № АААА-А17-117021310142-5, а разработка первой версии классификации состояний по типам «аэрозольной погоды» в 2019 г. осуществлена в рамках задач, выполняемых при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 19-77-20092).

1. Розенберг Г.В. Рассеяние света в земной атмосфере // Успехи физ. наук. 1960. Т. 71, вып. 2. С. 173–213.
2. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
3. Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б. Оптическая стратификация атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1971. Т. 7, № 7. С. 737–749.
4. Bullrich K. Scattering Radiation in the Atmosphere and the Natural Aerosol // Adv. Geophys. 1964. V. 10. P. 99–260.
5. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Советское радио, 1966. 317 с.
6. Розенберг Г.В. Оптические исследования атмосферного аэрозоля // Успехи физ. наук. 1968. Т. 95, вып. 1. С. 159–208.

7. Розенберг Г.В. Свойства атмосферного аэрозоля по данным оптического исследования // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1967. Т. 3, № 9. С. 936–949.
8. Атмосферный аэрозоль и его влияние на перенос излучения / под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 119 с.
9. Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеониздат, 1986. 160 с.
10. Розенберг Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетически обусловленные параметры // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1983. Т. 19, № 1. С. 21–35.
11. IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324> (last access: 29.03.2019).
12. Stone R.S., Sharma S., Herber A., Eleftheriadis K., Nelson D.W. A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements // Elem. Sci. Anth. 2014. V. 2. P. 27. DOI: <http://doi.org/10.12952/journal.elementa.000027>.
13. Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г. Суточный ход концентрации аэрозоля (PM<sub>10</sub>) летом в Московском регионе // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 495–500.
14. Reche C., Querol X., Alastuey A., Viana M., Pey J., Moreno T., Rodriguez S., Onzalez Y., Fernandez-Camacho R., Sanchez de la Campa A.M., de la Rosa J., Dall'Osto M., Prevot A.S.H., Hueglin C., Harrison R.M., Quincey P. Variability of levels of PM, black carbon and particle number concentration in European cities // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2011. N 11. P. 8665–8717.
15. Arkouli M., Ulke A.G., Endlicher W., Baumbach G., Schultz E., Vogt U., Müller M., Dawidowski L., Faggi A., Benning U.W., Scheffknecht G. Distribution and temporal behavior of particulate matter over the urban area of Buenos Aires // Atmos. Poll. Res. 2010. V. 1, N 1. P. 1–8.
16. Perez N., Pey J., Cusack M., Reche C., Querol X., Alastuey A., Viana M. Variability of particle number, black carbon, and PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub> levels and speciation: Influence of road traffic emissions on urban air quality // Aerosol Sci. Technol. 2010. V. 44, iss. 7. P. 487–499.
17. Delene D.J., Ogren J.A. Variability of aerosol optical properties at four north American surface monitoring sites // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 4. P. 1135–1150.
18. Boucher O., Bellassen V., Benveniste H., Ciais P., Criqui P., Guivarch C., Le Treut H., Mathy S., Seferian R. In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research // Proc. Nat. Acad. Sci. V. 113, N 27. P. 7287–7290. DOI: 10.1073/pnas.1607739113.
19. Горчаков Г.И. Матрица рассеяния и типы оптической погоды // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1973. Т. 9, № 2. С. 204–210.
20. Георгиевский Ю.С., Розенберг Г.В. Влажность как фактор изменчивости аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1973. Т. 9, № 2. С. 126–138.
21. Сидоров В.Н., Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Суточный ход оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1984. Т. 20, № 12. С. 1156–1164.
22. Розенберг Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетически обусловленные параметры // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1983. Т. 19, № 1. С. 21–35.
23. Исаков А.А., Свириденков М.А., Сидоров В.Н. О конденсационной трансформации индикатрисы рассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1983. Т. 19, № 12. С. 1321–1324.
24. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
25. Panchenko M.V., Kabanov M.V., Fadeev V.Ya. Statistical model of directed light scattering coefficients of coastal haze // J. Opt. Soc. Am. 1985. N 10. P. 1735.
26. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля // Физика атмосферы и проблема климата. М.: Наука, 1980. 260 с.
27. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В. Микрофизическая интерпретация однопараметрической модели поляризационных индикатрис (дымка прибрежного района) // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1986. Т. 22, № 10. С. 1042–1049.
28. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpigova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5722–5741. DOI: 10.1080/01431161.2014.945010.
29. Шмаргунов В.П., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Польшкин В.В., Панченко М.В. Автоматизированный аэрозольный нефелометр на базе ФАН // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 165.
30. Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Аэрозольный счетчик на базе АЗ-5 // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 165.
31. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 155–157.
32. Шмаргунов В.П., Польшкин Вик.В., Тумаков А.Г., Панченко М.В., Польшкин Вас.В. Ореольный фотометр закрытого объема // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 155–157.
33. Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Terpigova S.A., Kozlov V.S. Active spectral nephelometry as a method for the study of submicron atmospheric aerosols // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, iss. 9. P. 2567–2583.
34. Панченко М.В., Терпугова С.А., Докукина Т.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Многолетняя изменчивость конденсационной активности аэрозоля в г. Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 314–318; Panchenko M.V., Terpigova S.A., Dokukina T.A., Pольшкин V.V., Yausheva E.P. Multiyear variations in aerosol condensation activity in Tomsk // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 251–255.
35. Терпугова С.А., Докукина Т.А., Яушева Е.П., Панченко М.В. Сезонные особенности проявления различных типов гигрограмм коэффициента рассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 952–957.
36. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of Black Carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 11. P. 2611–2620.
37. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–569; Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Diurnal variations of the submicron aerosol and



- black carbon in the near-ground layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 1. P. 30–38.
38. *Полькин В.В.* Учет зависимости границ диапазонов размеров частиц от комплексного показателя преломления материала частиц в фотоэлектрических счетчиках // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 5. С. 442–446.
39. *Любовцева Ю.С., Розенберг Г.В.* Ореольная часть индикатрисы рассеяния в приземном воздухе // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1966. Т. 2, № 3. С. 248–262.
40. *Горчаков Г.И., Исаков А.А.* Ореольные индикатрисы рассеяния // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1974. Т. 10, № 5. С. 504–511.

*M.V. Panchenko, V.V. Pol'kin, Vas.V. Pol'kin, V.S. Kozlov, E.P. Yausheva, V.P. Shmargunov.* **The size distribution of the “dry matter” of particles in the surface air layer in suburbs of Tomsk within the empirical classification of “aerosol weather” types.**

Based on the integrated monitoring of aerosol characteristics in suburbs of Tomsk (2000–2017), a version of classification of the surface air layer state according to “aerosol weather” types is suggested. As a basis of the measurement technique, we use the principle of separate study of the variability of the “dry matter” of aerosol particles and their condensation activity.

The “aerosol weather” types was carried out in the coordinates ( $\sigma_d$ ;  $P$ ), where  $\sigma_d$  is the scattering coefficient of the dry matter of aerosol ( $\lambda = 0.51 \mu\text{m}$ );  $P$  is the ratio of the mass concentration of the absorbing substance to the mass concentration of submicron particles, which reflects the degree of “blackening” of the particles. The data array is divided into two classes by the value of the scattering coefficient  $\sigma_d = 100 \text{ Mm}^{-1}$ : “atmospheric haze” ( $\sigma_d < 100 \text{ Mm}^{-1}$ ) and “haze” ( $\sigma_d > 100 \text{ Mm}^{-1}$ ). Then the array of observational data is divided by the value  $P = 0.05$ . In each calendar season, in accordance with the parameters specified, four types of “aerosol weather” are identified, which are conventionally designated as “background” ( $P < 0.05$ ,  $\sigma_d < 100 \text{ Mm}^{-1}$ ), “haze-S” ( $P > 0.05$ ,  $\sigma_d < 100 \text{ Mm}^{-1}$ ), “smog” ( $P > 0.05$ ,  $\sigma_d > 100 \text{ Mm}^{-1}$ ), and “smoke haze” ( $P < 0.05$ ,  $\sigma_d > 100 \text{ Mm}^{-1}$ ). It is shown that the main “aerosol weather” types are reliably different in the ratio of the content of submicron and coarse particles in all seasons.