

# Исследование содержания летучих веществ в составе атмосферных частиц разных размеров на основе термического воздействия и регистрации фотоэлектрическими счетчиками

В.В. Польшкин<sup>✉</sup>, М.В. Панченко, С.А. Терпугова, В.П. Шмаргунов\*

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

Поступила в редакцию 16.02.2024;

после доработки 15.03.2024;

принята к печати 19.03.2024

Представлено описание автоматизированного комплекса, созданного для измерений содержания веществ с разной летучестью в шести диапазонах размеров частиц от 0,3 до 5 мкм при искусственном нагреве от 25 до 200 °С (с промежуточной точкой 100 °С). Концентрация частиц регистрировалась фотоэлектрическим счетчиком. Приборный комплекс был апробирован в отдельных сериях круглосуточных наблюдений в разные сезоны 2021–2023 гг. Проведено сравнение измерений фотоэлектрическим счетчиком и интегральным нефелометром в декабре 2022 г. и марте 2023 г. Показано, что вариации долевого содержания растворимых сернистых соединений по данным счетчика хорошо согласуются с изменчивостью параметра конденсационной активности. Применение метода термического воздействия позволит получить дополнительные сведения о сезонном и суточном ходе состава аэрозоля в среднedisперсном диапазоне размеров частиц.

**Ключевые слова:** аэрозоль, летучие компоненты, термическое воздействие, фотоэлектрические счетчики частиц; aerosol, volatile components, thermal impact, optical counter.

## Введение

Развитие моделей оптических характеристик аэрозоля, обеспечивающих оценки его вклада в радиационный форсинг [1–8], и эффективность применения различных систем, работающих через атмосферу, во многом зависят от обеспеченности данными натурных измерений. Как показывает наш опыт, корректная оценка радиационно-значимых свойств аэрозоля возможна только при сочетании результатов длительного мониторинга его основных характеристик и поэтапного развития на этой базе эмпирических вычислительных моделей с ограниченным набором измеряемых входных параметров [6–8]. При использовании эмпирических данных для расчета оптических и радиационных характеристик аэрозоля существует достаточно сложная проблема в моделировании комплексного показателя преломления частиц разных размеров, который определяется их физико-химическим составом. В современной версии разрабатываемой нами модели [7, 8] функция распределения по размерам задается супер-

позицией двух широких мод – субмикронных и грубодисперсных частиц. При оценке комплексного показателя преломления  $m = n - ix$  субмикронных частиц расчет проводится при задании  $n = 1,5$  для (условно «сухого») непоглощающего аэрозоля ( $x = 0$ ) и с добавлением по правилу смеси узкой фракции поглощающего вещества ( $m = 1,8 - 0,74 \cdot i$ ) в его состав. Далее осуществляется вычисление трансформации функции распределения по размерам и комплексного показателя преломления частиц разных размеров вследствие изменения доли воды в их составе при вариациях относительной влажности воздуха [7].

Показано, что уже на основе этой версии модели удастся восстановить основные оптические характеристики в видимой области спектра с неопределенностью, вполне пригодной для решения многих научных и прикладных задач. [8]. Известно, что концентрация и химический состав частиц определяются сложным комплексом внешних процессов различного пространственно-временного масштаба. В каждый момент времени в пункте наблюдений распределение аэрозоля по размерам и его химический состав зависят как от предыстории зарождения воздушной массы, ее траектории и времени перемещения к пункту наблюдений, так и от постоянной трансформации под воздействием быстропро-

\* Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Светлана Александровна Терпугова (swet@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

текающих процессов и влиянием местных природных и антропогенных источников [9].

Очевидно, что обеспечить мониторинг состава частиц разных размеров с применением канонических методов химического анализа для оценки зависимости показателя преломления от размера частиц  $m = f(r)$  с хорошим разрешением по времени не представляется возможным из-за их неоперативности и большой трудоемкости. Определенный прогресс в решении этой задачи связан с исследованиями летучести аэрозольных частиц с применением термоанализа в лабораторных [10–13] и натуральных [14–16] условиях. В этих экспериментах осуществлялась прокачка воздуха, содержащего аэрозольные частицы, через нагреватель (термоденудер) и в зависимости от задачи измерялись размер, концентрация или масса частиц по мере нагрева до соответствующей температуры, что позволяло косвенно оценить относительное содержание основных веществ в их составе.

Ориентируясь на результаты термоанализа с применением оптических методов в натуральных условиях [17], нами с 1998 г. в мониторинговом режиме на Аэрозольной станции ЛОА ИОА СО РАН [18] исследуются зависимости коэффициента направленного рассеяния под углом  $45^\circ$  в видимой области спектра от температуры в диапазоне  $25\text{--}250^\circ\text{C}$  [19].

С 2021 г. были начаты круглосуточные измерения термооптических характеристик аэрозоля с помощью интегрального нефелометра. Полученный к настоящему времени многолетний ряд данных позволил выявить основные сезонные и межгодовые изменения относительного объемного содержания веществ разной летучести в составе субмикронного аэрозоля в целом [19], но оставил открытым вопрос об их распределении в среднedisперсном диапазоне — области суперпозиции функций распределения субмикронных и грубодисперсных частиц разного происхождения и времени жизни в приземном слое атмосферы [20]. Для косвенной оценки вклада частиц разного физико-химического состава в диапазоне размеров  $r = 0,15\text{--}2,5$  мкм и оценки его временной динамики с 2021 г. были начаты круглосуточные исследования летучести вещества аэрозольных частиц при искусственном нагреве с применением фотоэлектрических счетчиков [21] и интегрального нефелометра.

Цель работы — оценка перспектив применения метода термического воздействия на аэрозольные частицы разных размеров в диапазоне чувствительности фотоэлектрических счетчиков.

## Материалы и методы

Для исследования летучести компонентов аэрозольных частиц разных размеров при контролируемом термическом воздействии был создан автоматизированный комплекс и проведены серии круглосуточных измерений объемных коэффициентов

рассеяния  $\sigma$  на длине волны  $0,545$  мкм нефелометром М903 и счетных концентраций атмосферного аэрозоля  $N(r)$  фотоэлектрическим счетчиком АЗ-10.

Основные элементы комплекса описаны нами в [19], а также другими авторами в [10–16]. Этими элементами являются: 1) воздухозаборник, через который осуществляется непрерывный отбор атмосферного воздуха в течение измерительного цикла; 2) камера регулируемого нагрева (термоденудер — ТД); 3) разветвитель для автоматического разделения потока в аэрозольный счетчик и нефелометр; 4) фотоэлектрический счетчик АЗ-10; 5) интегральный нефелометр М903; 6) система управления и регистрации данных. Общая длина трубки ТД внутренним диаметром  $1$  см составляет  $50$  см, длина нагревательной части трубки —  $40$  см. Скорость прокачки —  $2$  л/мин. Время нахождения аэрозоля в ТД, согласно указанным параметрам трубки и скорости прокачки, составляет  $12\text{--}15$  с.

Методика была следующей: при начальной температуре  $25^\circ\text{C}$  определялись коэффициент рассеяния, затем — концентрация в диапазонах диаметров сухих частиц  $0,33\text{--}0,44$ ,  $0,44\text{--}0,54$ ,  $0,54\text{--}1,02$ ,  $1,02\text{--}2,1$ ,  $2,1\text{--}5,4$  мкм и суммарное содержание частиц диаметром  $> 5,4$  мкм. Далее по заданной программе автоматически включался нагреватель, при достижении определенной температуры воздушного потока нагрев останавливался, и температура удерживалась в пределах  $T \pm 1^\circ$  в течение  $7\text{--}8$  мин, необходимых для регистрации исследуемых характеристик.

Затем осуществлялся переход к следующему значению температуры, и измерения повторялись. Время полного цикла с тремя фиксированными значениями температуры в диапазоне  $25\text{--}200^\circ\text{C}$  составляло  $\sim 40\text{--}50$  мин. Циклы повторялись круглосуточно один раз в три часа. Все измерения проводились на Аэрозольной станции ИОА СО РАН [18], работающей в мониторинговом режиме, что обеспечивало возможность комплексной оценки состояния атмосферы в период наблюдения в каждом сеансе.

В многолетнем цикле проведенных нами ранее исследований термооптических характеристик атмосферного аэрозоля [19] анализ изменения коэффициента направленного рассеяния проводился в диапазонах температур  $25\text{--}100$  и  $100\text{--}250^\circ\text{C}$ .

Для количественного описания термограмм были введены параметры  $F$ ,  $Q$  и  $S$ , которые позволяли оценить объемную долю компонентов, испаряющихся в соответствующих диапазонах температур:

$$F = \frac{\mu(25^\circ\text{C}) - \mu(100^\circ\text{C})}{\mu(25^\circ\text{C})}, \quad Q = \frac{\mu(100^\circ\text{C}) - \mu(250^\circ\text{C})}{\mu(25^\circ\text{C})},$$
$$S = \frac{\mu(250^\circ\text{C})}{\mu(25^\circ\text{C})}, \quad (1)$$

где  $\mu(T)$  — коэффициент направленного светорассеяния под углом  $45^\circ$  при нагреве аэрозоля до указанной температуры.

Измерения всех аэрозольных характеристик на станции проводятся при  $T = 25^\circ\text{C}$  (относительная

влажность не более 20%), и частицы рассматриваются нами как «сухие» [19].

Выбор реперных значений температуры был продиктован следующими соображениями.

1. При увеличении температуры от 25 до 100 °C в первую очередь испаряются высоколетучие соединения и связанная вода [9, 22].

2. Из данных химических исследований известно, что в формировании состава субмикронных аэрозольных частиц большую роль играют сульфатные соединения [23, 24], которые имеют температуру разложения в интервале 150–200 °C [25]. Оценки летучести сульфата и бисульфата аммония, которые практически всегда присутствуют в атмосферном аэрозоле и во многом определяют его гигроскопические свойства [16, 26, 27], проводились путем сопоставления летучести вещества атмосферного аэрозоля с результатами лабораторных экспериментов по измерению чистых солей [27]. Следовательно, можно полагать, что объемная доля вещества частиц, улетучивающегося в диапазоне  $T = 100\text{--}200$  (250) °C, представлена преимущественно сульфатами.

3. Учитывая, что в диапазоне размеров более 1 мкм определенный вклад в состав аэрозоля вносят грубодисперсные частицы, оставшийся объем при нагреве до  $T = 250$  °C, вероятно, содержит элементный углерод, полимеризованные органические соединения, оксид кремния, минеральные вещества и соединения металлов [9, 17]. В настоящей работе мы используем следующие условные термины: параметр  $F$  — высоколетучие соединения,  $Q$  — сульфаты, и  $S$  — нелетучий остаток.

Для сравнения с результатами ранее проведенных исследований [19] в настоящей работе рассмотрены те же температурные интервалы. Из-за методических особенностей измерений счетчиком конечная точка нагрева взята не 250, а 200 °C. Это не вносит больших неопределенностей в получаемые результаты, поскольку, как показывают данные наших многолетних измерений, снижение коэффициента рассеяния в диапазоне  $T = 200\text{--}250$  °C не превышает 7%.

По аналогии с формулой (1) для исследуемых характеристик будем использовать те же параметры, дополнив их соответствующими индексами:  $F_\sigma$ ,  $Q_\sigma$ ,  $S_\sigma$  — данные интегрального нефелометра и  $F_N$ ,  $Q_N$  и  $S_N$  — измерения счетчиком.

## Результаты и обсуждение

Апробация приборного комплекса была проведена в 2021–2023 гг. отдельными циклами круглосуточных наблюдений в разные сезоны. На рис. 1 представлены среднемесячные объемные концентрации частиц  $dVi$  с разными диапазонами диаметров  $d$ , полученные в феврале 2023 г.

Как видно, при нагреве аэрозоля от 25 до 100 °C в диапазоне размеров частиц от 0,33 до 2 мкм наблюдается снижение их суммарных объемов за счет испарения высоколетучих соединений. Далее при нагреве до 200 °C на этом же участке спектра раз-

меров уменьшение объемов продолжается из-за испарения сульфатных соединений. В то же время при  $d > 2$  мкм летучесть вещества частиц выражена намного слабее, а следовательно, практически весь состав частиц определяется нелетучим остатком.

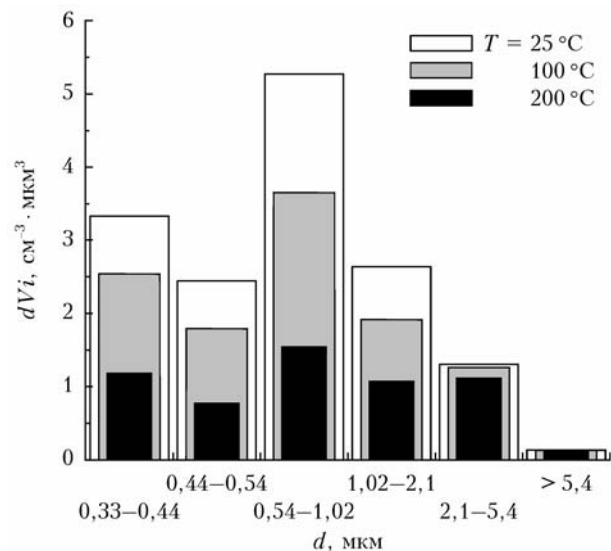


Рис. 1. Среднемесячные значения (февраль 2023 г.) объемных концентраций  $dVi$  аэрозольных частиц при нагреве до 25, 100 и 200 °C

Предварительные данные, полученные с применением фотоэлектрического счетчика, показали, что в целом результаты определения содержания растворимых веществ по параметру  $Q_N$  в диапазоне размеров частиц от 0,2 мкм хорошо согласуются с имеющимися представлениями о среднем составе континентального аэрозоля [28, 29]. Более того, было выяснено, что в вариациях соотношения долей растворимых солей  $Q_N$  («сульфатов») и нелетучего остатка  $S_N$  в составе частиц явно проявляются закономерные сезонные особенности, которые, как известно [26], и определяют их конденсационный рост.

Для оценки применимости метода термоанализа с целью более детального изучения временной изменчивости свойств атмосферного аэрозоля было проведено сравнение значений  $F_N$ ,  $Q_N$ ,  $S_N$  в декабре 2022 г. и марте 2023 г. Выбор этих серий наблюдений основывался на том, что по данным многолетнего мониторинга (в марте — начале апреля) в годовом ходе, как правило, наблюдались максимальные значения конденсационной активности направленного коэффициента рассеяния под углом 45° (далее  $\gamma_{45}$ ) [30]. В период проведения анализируемой серии исследований на Аэрозольной станции в декабре 2022 г. были отмечены низкие среднемесячные значения конденсационной активности ( $\gamma_{45} = 0,33$  [31]), а в марте 2023 г. — высокие ( $\gamma_{45} = 0,49$ ).

На рис. 2 представлены объемные доли компонентов  $F_N$ ,  $Q_N$  и  $S_N$  частиц различных размеров, в которых испаряются вещества в соответствующих диапазонах температур по данным, полученным в декабре 2022 г. и марте 2023 г.

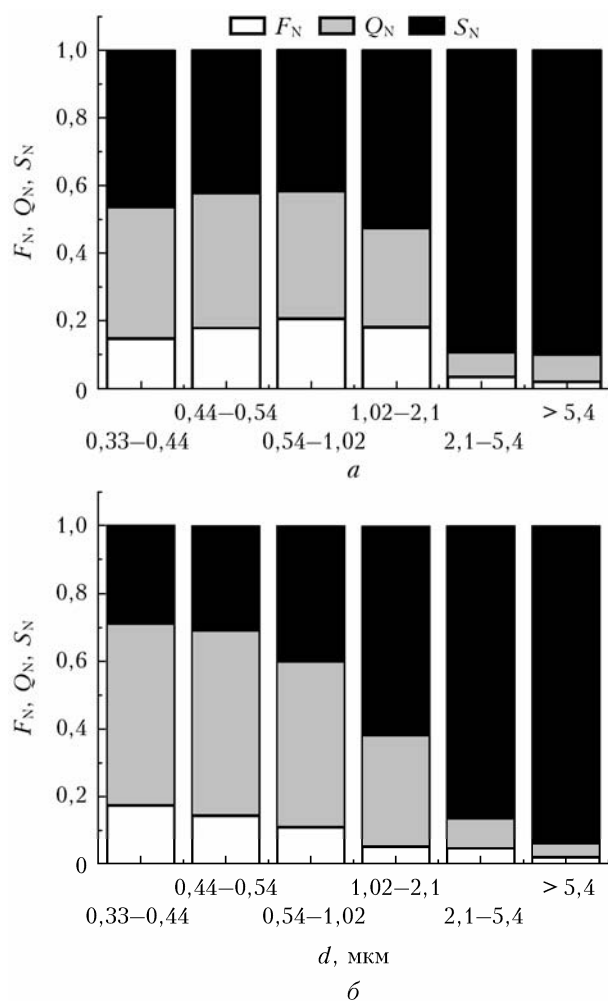


Рис. 2. Среднемесячные значения объемных долей компонентов  $F_N$  (высоколетучие),  $Q_N$  (сульфаты) и  $S_N$  (нелетучий остаток) в декабре 2022 г. (а) и марте 2023 г. (б)

Как следует из рис. 2, а, в декабре в субмикронных частицах доля  $Q_N$  составляла 30–40% и снижалась до 8% с увеличением диаметра частиц до 5 мкм.

В свою очередь, в марте (рис. 2, б) в диапазоне субмикронных частиц наблюдалось уже более высокое содержание  $Q_N$  (от 0,3 до 0,55). Следовательно, доля  $S_N$  в субмикронной области размеров по сравнению с декабрьскими значениями была почти в два раза меньше.

На рис. 3 для этих же серий наблюдений приведены параметры  $F_\sigma$ ,  $Q_\sigma$ ,  $S_\sigma$  по данным интегрального нефелометра и суммарные значения  $F_N^*$ ,  $Q_N^*$ ,  $S_N^*$  в субмикронном диапазоне частиц до радиуса  $r = 1$  мкм, измеренных счетчиком (звездочка означает субмикронный диапазон размеров частиц).

Как и ожидалось, низкие значения конденсационной активности ( $\gamma_{45} = 0,33$ ) в декабре и высокие в марте ( $\gamma_{45} = 0,49$ ) действительно хорошо согласуются с долевым содержанием растворимых солей — «сульфатов». Следовательно, вполне можно полагать, что информация о составе аэрозоля, получаемая из измерений фотоэлектрическими счетчиками

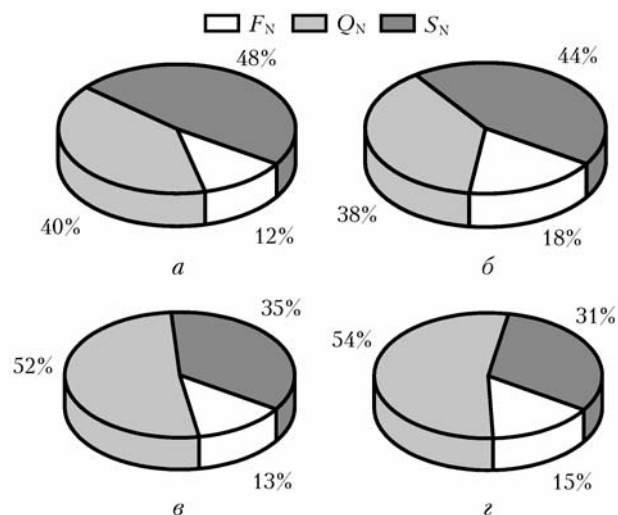


Рис. 3. Среднемесячные значения объемных долей субмикронных частиц  $F_N^*$ ,  $Q_N^*$ ,  $S_N^*$ , измеренных счетчиком АЗ-10 (а, в), и параметров  $F_\sigma$ ,  $Q_\sigma$ ,  $S_\sigma$  по данным интегрального нефелометра М903 (б, г) в декабре 2022 г.;  $\gamma_{45} = 0,33$  (а, б) и марте 2023 г.,  $\gamma_{45} = 0,49$  (в, г)

с искусственным нагревом аэрозольного потока, будет полезна при изучении частиц в самом сложном для анализа среднedisперсном диапазоне размеров.

## Заключение

В статье проведено сравнение результатов измерений с применением счетчика и интегрального нефелометра в декабре 2022 г. и марте 2023 г., когда, согласно многолетним данным, значительно различается конденсационная активность аэрозоля, а значит, и содержание растворимого вещества в его составе. Показано, что оценки доли «сульфатов» по данным измерений методом термического воздействия хорошо согласуются с параметрами, характеризующими конденсационный процесс. Это подтверждает целесообразность развития аппаратной базы и постановки регулярных исследований состава частиц в среднedisперсном диапазоне размеров с применением фотоэлектрических счетчиков.

Полагаем, что ввод нового инструментального комплекса в режим мониторинговых измерений и данные о сезонном и суточном ходе анализируемых в этой работе характеристик восполнят недостаток информации о комплексном показателе преломления и параметре конденсационной активности частиц в среднedisперсном диапазоне размеров.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

## Список литературы

1. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
2. Penner J., Andreae M., Annegarn H., Barrie L., Feichter J., Hegg D., Jayaraman A., Leaitch R., Murphy D., Nganga J., Pitari G. Aerosols, their direct and

- indirect effects // *Climate Change 2001: Working group I: The Scientific Basis* / J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. Linden, X. Dai, K. Maskell, C. Johnson (eds.). New York, Cambridge: Cambridge University Press, 2001. Chap. 5. P. 289–348.
3. Haywood J., Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols. A review // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38. P. 513–543.
  4. Takemura T., Nakajima T., Dubovik O., Holben B., Kinne S. Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model // *J. Clim.* 2002. V. 15. P. 333–352.
  5. Bellouin N., Quaas J., Gryspeerdt E., Kinne S., Stier P., Watson-Parris D., Boucher O., Carslaw K., Christensen M., Daniau A.-L., Dufresne J.-L., Feingold G., Fiedler S., Forster P., Gettelman A., Haywood J.M., Malavelle F., Lohmann U., Mauritsen T., McCoy D., Myhre G., Mülmenstädt J., Neubauer D., Possner A., Rugenstein M., Sato Y., Schulz M., Schwartz S.E., Sourdéal O., Storelvmo T., Toll V., Winker D., Stevens B. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change // *Rev. Geophys.* 2020. V. 58. P. e2019RG000660. DOI: 10.1029/2019RG000660.
  6. Yu H., Kaufman Y., Chin M., Feingold G., Remer L., Anderson T., Balkanski Y., Bellouin N., Boucher O., Christopher S., DeCola P., Kahn R., Koch D., Loeb N., Reddy M., Schulz M., Takemura T., Zhou M. A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 613–666. DOI: 10.5194/acpd-5-7647-2005.
  7. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
  8. Зенкова П.Н., Терпугова С.А., Польшин В.В., Польшин В.С., Ужегов В.Н., Козлов В.С., Яушева Е.П., Панченко М.В. Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 3. С. 192–198. DOI: 10.15372/AOO20210305; Zenkova P.N., Terpigova S.A., Pol'kin V.V., Pol'kin V.S., Uzhegov V.N., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Panchenko M.V. Development of an empirical model of optical characteristics of aerosol in Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 4. P. 320–326. DOI: 10.1134/S1024856021040151.
  9. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 368 с.
  10. An W.J., Pathak R.K., Lee B.H., Pandis S.N. Aerosol volatility measurement using an improved thermogravimetric analysis: Application to secondary organic aerosol // *J. Aerosol Sci.* 2007. V. 38. P. 305–314. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2006.12.002.
  11. Faulhaber A.E., Thomas B.M., Jimenez J.L., Jayne J.T., Worsnop D.R., Ziemann P.J. Characterization of a thermogravimetric-mass spectrometer system for the study of organic aerosol volatility and composition // *Atmos. Meas. Tech.* 2009. V. 2. P. 15–31. DOI: 10.5194/amt-2-15-2009.
  12. Cappa C.D., Wilson K.R. Evolution of organic aerosol mass spectra upon heating: Implications for OA phase and partitioning behavior // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 1895–1911. DOI: 10.5194/acp-11-1895-2011.
  13. Saleh R., Shihadeh A., Khlystov A. On transport phenomena and equilibration time scales in thermogravimetric analysis // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 571–581. DOI: 10.5194/amt-4-571-2011.
  14. Backman J., Virkkula A., Petaja T., Aurela M., Frey A., Hillamo R. Impacts of volatilisation on light scattering and filter-based absorption measurements: A case study // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3. P. 1205–1216. DOI: 10.5194/amt-3-1205-2010.
  15. Hakkinen S.A.K., Aijala M., Lehtipalo K., Junninen H., Backman J., Virkkula A., Nieminen T., Vesenius M., Hakola H., Ehn M., Worsnop D.R., Kulmala M., Petaja T., Riipinen I. Long-term volatility measurements of submicron atmospheric aerosol in Hyytiälä, Finland // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 10771–10786. DOI: 10.5194/acp-12-10771-2012.
  16. Huffman J.A., Docherty K.S., Aiken A.C., Cubison M.J., Ulbrich I.M., DeCarlo P.F., Sueper D., Jayne J.T., Worsnop D.R., Ziemann P.J., Jimenez J.L. Chemically-resolved aerosol volatility measurements from two megacity field studies // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 7161–7182. DOI: 10.5194/acp-9-7161-2009.
  17. Любовецва Ю.С., Юдин Н.И. О природе летучей и нелетучей составляющей субмикронного аэрозоля // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана*. 1982. Т. 18, № 7. С. 732–737.
  18. Онлайн-мониторинг. Аэрозольная станция ЛОА. Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева. Томск, 2024. URL: aerosol.iao.ru (дата обращения: 16.09.2024).
  19. Терпугова С.А., Панченко М.В., Докукина Т.А., Яушева Е.П., Козлов В.С. Сезонная изменчивость содержания веществ разной степени летучести в приземном аэрозоле по данным термооптических измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 6. С. 439–443.
  20. Панченко М.В., Польшин В.В. Представление о микроструктуре тропосферного аэрозоля Сибири на основе измерений фотоэлектрическим счетчиком // *Оптика атмосф. и океана*. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 526–537.
  21. Pol'kin V.V., Panchenko M.V. Aspects of a technique for investigation of the volatility parameters of species in the composition of atmospheric aerosol in the size range 0.3–5 μm // *Proc. SPIE*. 2023. V. 12780. DOI: 10.1117/12.2688315.
  22. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352 с.
  23. Загайнов В.А., Костина Е.М., Юдин Н.И. Влияние поверхности на энергию активации испарения аэрозольных частиц сульфата аммония // *Хим. физ.* 1985. Т. 4, № 7. С. 1000–1003.
  24. Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. Механизм нефотохимического образования сульфатов в аэрозольной дымке // *Метеорол. и гидрол.* 2023. № 2. С. 90–99.
  25. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. М.: Химия, 1966. Т. 1. 1072 с.
  26. Cai M., Tan H., Chan C.K., Mochida M., Hatakeyama S., Kondo Y., Schurman M.I., Xu H., Li F., Shimada K., Li L., Deng Y., Yai H., Matsuki A., Qin Y., Zhao J. Comparison of aerosol hygroscopicity, volatility, and chemical composition between a suburban site in the Pearl River delta region and a marine site in Okinawa // *Aerosol Air Qual. Res.* 2017. V. 17. P. 3194–3208. DOI: 10.4209/aaqr.2017.01.0020.
  27. Mikhailov E., Vlasenko S., Niessner R., Poschl U. Interaction of aerosol particles composed of protein and salts with water vapor: Hygroscopic growth and microstructural rearrangement // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 323–350. DOI: 10.5194/acp-4-323-2004.
  28. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic

- equilibrium with the surrounding moist air // *Adv. Geophys.* 1976. V. 19. P. 74–183.
29. *Warneck P.* Chemistry of the Natural Atmosphere. San Diego, CA: Academic Press, 1988. V. 41. 330 p. (International Geophysics Series).
30. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Полькин В.В., Яушева Е.П.* Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
31. *Terpugova S.A., Antonov A.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Pol'kin Vas.V., Pol'kin Vik.V., Shmargunov V.P., Panchenko M.V.* Variability of monthly average characteristics of the aerosol condensation activity in annual behavior // *Proc. SPIE*. 2023. V. 12780. P. 127802C. DOI: 10.1117/12.2689797.

*V.V. Pol'kin, M.V. Panchenko, S.A. Terpugova, V.P. Shmargunov.* **Study of the content of volatile species in the composition of atmospheric particles on the basis of thermal impact and recording by optical counters.**

A description of the designed automated complex is presented. The results of measurements of the content of species with different volatility in six particle size ranges from 0.3 to 5  $\mu\text{m}$  with artificial heating from 25 °C to 100 and 200 °C are discussed. The particle concentration was recorded by an optical counter. The instrumentation complex was tested in the period 2021–2023 in separate series of round-the-clock observations in different seasons. It has been shown that variations in the relative content of soluble sulfur compounds according to the counter data are in good agreement with the variability of the values of the parameter of condensation activity. In general, we believe that the use of this method will make it possible to obtain additional information about the seasonal and diurnal variations in aerosol composition in the intermediate range of particle sizes.