

Конденсационная активность частиц атмосферного аэрозоля разного размера по данным фотоэлектрического счетчика

В.В. Польшкин, М.В. Панченко, С.А. Терпугова*

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

Поступила в редакцию 14.09.2021 г.

Рассмотрены результаты проводимого с октября 2020 г. по июнь 2021 г. экспериментального исследования конденсационной активности частиц разных размеров с применением фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-10, оснащенного системой искусственного увлажнения забираемого из атмосферы аэрозоля. Параллельно с этими наблюдениями проводились измерения гигрограмм объемного коэффициента аэрозольного рассеяния интегральным нефелометром М903. Типичность атмосферных условий и характеристик аэрозоля в период измерений подтверждена результатами сравнения с данными многолетних исследований параметра конденсационной активности для коэффициента рассеяния под углом 45° .

Ключевые слова: аэрозоль, фотоэлектрический счетчик, конденсационная активность; aerosol, photoelectric counter, condensation activity.

Введение

Известно, что один из наиболее важных факторов, определяющих изменение оптических свойств атмосферного аэрозоля и, следовательно, его радиационно-климатического воздействия, — это влияние относительной влажности воздуха [1–6]. При росте относительной влажности воздуха RH происходит увеличение доли воды в составе частиц, соответствующая трансформация спектра размеров и изменение комплексного показателя преломления [1]. Сильная изменчивость состояния аэрозоля в атмосфере во времени и пространстве ограничивает возможности использования каких-либо модельных представлений или данных отдельных наблюдений для корректного учета связи между микрофизическими характеристиками аэрозоля и относительной влажностью воздуха в задачах восстановления оптических характеристик атмосферного аэрозоля по результатам измерений спектра размеров. Более того, даже при наличии сведений о химическом составе частиц заметный диапазон значений конденсационной активности частиц разных размеров может оставаться неопределенным, поскольку даже малое количество вещества с высокой растворимостью, которое практически не сказывается на виде функции распределения по размерам, может существенно повлиять на начало и развитие процесса взаимодействия аэрозоля с парами воды.

Гигроскопические свойства аэрозолей различного происхождения изучаются уже на протяжении многих лет. Для этого исследователи применяют различные методы и приборы: каскадные импакторы [7, 8], масс-спектрометры [9, 10], анализаторы подвижности частиц [11–15], нефелометры [16–18] и т.д. Для оценки влияния химического состава на гигроскопичность аэрозольных частиц в лабораторных условиях проведены эксперименты с частицами чистых солей и растворов [19–22]. На основе измерений в природных условиях в континентальных и прибрежных районах Евразии и Северной Америки [23–38] получены оценки трансформации оптических и микроструктурных характеристик аэрозоля под воздействием относительной влажности. В работах [18, 29, 30, 33, 37–40] проанализированы сезонная и суточная изменчивость гигроскопических свойств аэрозоля, а также зависимость конденсационной активности от типа и направления переноса воздушных масс [23–25, 34]. На основе обобщения большого цикла лабораторных и природных исследований, проведенных в прошлом веке, А.Г. Лактионовым развита теория равновесной гетерогенной конденсации [41].

Применительно к проблеме описания конденсационного роста частиц разных размеров при увеличении относительной влажности воздуха в [32, 33] показано: в моде ядер Айткена наблюдается преобладание гидрофобных частиц, а в аккумуляционной моде радиуса $r \sim 0,1\text{--}0,2$ мкм — гигроскопичных. Как следует из результатов [7, 26, 31, 34, 37], гигроскопичность более крупных частиц с $r > 0,2$ мкм снижается с увеличением их размера.

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

Сейчас в научной литературе для описания гигроскопического роста аэрозолей используется ряд простых эмпирических формул [42–46]. В [42, 43] предложен параметр гигроскопичности, отражающий влияние химического состава аэрозольных частиц на их конденсационную активность.

В исследованиях российских ученых [18, 24, 25, 47, 48] для описания зависимости радиуса частиц от относительной влажности воздуха широко используется эмпирическая формула типа Кастена–Хенела [49, 50], где ключевой параметр, определяющий динамику роста частицы при увлажнении, — это параметр конденсационной активности η .

В рамках поставленной задачи исследования конденсационной активности частиц для ее учета в региональной оптической модели напрямую воспользоваться уже накопленными сведениями невозможно по следующим причинам: как правило, наблюдения проводились в иных географических районах относительно короткими сериями; в большинстве известных экспериментов измерения проводились для ограниченного диапазона частиц ($r < 1$ мкм).

В наших исследованиях применяется подход, базирующийся на измерениях микроструктуры частиц атмосферного аэрозоля при влажности воздуха 20–40%, которые используются как приближение сухого аэрозоля, и контролируемом воздействии относительной влажности воздуха на оптические и микрофизические характеристики аэрозоля (искусственного увлажнения) [48]. По результатам исследований на сегодняшний день реализовано несколько этапов развития эмпирической модели оптических характеристик [51–54]. В существующей версии используется аппроксимация измеренных спектров размеров сухой фракции аэрозоля и поглощающего вещества (сажи). Для учета изменений функции распределения и комплексного показателя преломления аэрозоля при увлажнении [54] выбор факторов роста частиц разных размеров осуществляется эмпирически, методом итерационной подгонки по результатам сравнения вычисляемых оптических величин и измеряемого параметра конденсационной активности [53, 54].

Основная цель наших исследований состоит в совершенствовании методики корректного учета связи между микрофизическими характеристиками аэрозоля и относительной влажностью воздуха в задачах восстановления оптических характеристик аэрозоля. В настоящей работе представлены первые результаты изучения конденсационной активности аэрозоля с применением фотоэлектрического счетчика, оснащенного системой контролируемого изменения влажности воздуха, поступающего из атмосферы. Параллельно с этими наблюдениями проводился цикл измерений объемного коэффициента рассеяния интегральным нефелометром M903 с искусственным увлажнением исследуемого аэрозоля. Важно, что параметры конденсационной активности частиц разных размеров определяются с использованием разработанного нами метода [55], который позволяет учитывать смеще-

ние реально измеряемых размеров частиц за границы заданных изготовителем диапазонов фотоэлектрического счетчика. Ключевой момент этого метода в том, что с ростом относительной влажности воздуха снижается показатель преломления частиц и, следовательно, изменяется их оптический отклик по сравнению с частицами, используемыми при фабричной калибровке и имеющими другой показатель преломления, что зачастую не учитывают специалисты, работающие с подобными приборами.

Аппаратура и метод

Исследования конденсационной активности частиц разных размеров с применением фотоэлектрического счетчика проводились на Аэрозольной станции ИОА СО РАН (<http://aerosol.iao.ru>) [56]. Для этого была создана следующая измерительная система. Воздух из атмосферы через заборное устройство поступал в увлажнитель [57], в котором постепенно изменялась относительная влажность, далее поток направлялся в фотоэлектрический счетчик АЗ-10 [58]. Экспериментальная установка позволяла проводить оценки роста частиц при искусственном увлажнении воздуха от 40 до 85% в шести диапазонах размеров (согласно шкале прибора $r = 0,15 \div 0,2; 0,2 \div 0,25; 0,25 \div 0,5; 0,5 \div 1,0; 1,0 \div 2,5; > 2,5$ мкм). Воздушный поток после увлажнителя разделялся на два, один направлялся в счетчик АЗ-10, а другой — в интегральный нефелометр M903, что позволяло одновременно регистрировать объемный коэффициент аэрозольного рассеяния σ на длине волны 0,545 мкм как функцию относительной влажности.

На наш взгляд, наиболее важной методической проблемой при измерениях спектра размеров аэрозоля в реальной атмосфере с применением фотоэлектрических счетчиков является то, что сигнал, регистрируемый счетчиком, зависит не только от размера частиц, но и от комплексного показателя преломления $m = n - i\chi$, следовательно, это обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации результатов. Ранее были проведены оценки этой зависимости для различного типа фотоэлектрических счетчиков [59–63] и показано, что на частицы, у которых величина показателя поглощения $\chi < 0,1$, основное влияние оказывает действительная часть комплексного показателя преломления n .

В обсуждаемом эксперименте был проведен расчет соответствующих поправок для применяемого нами фотоэлектрического счетчика АЗ-10. Как правило, показатель преломления сухих частиц континентального атмосферного аэрозоля близок к $n = 1,5$ [64]. Серийные приборы калибровались с применением частиц латекса ($n = 1,6$), поэтому в исследованиях реального атмосферного аэрозоля нижние границы регистрируемых диапазонов радиусов на шкале АЗ-10, обозначим их $r_{lb, i}$ (lb — lower boundary, i — номер диапазона), сместятся от $r_{lb, i, f}$ (f — factory — фабричная калибровка) к $r_{lb, i, d}$

(d – dry – сухие частицы) и примут следующие значения: 0,17; 0,22; 0,27; 0,51; 1,05; 2,68 мкм (таблица). При увеличении относительной влажности воздуха и ассимиляции влаги частицами происходит снижение показателя преломления [1, 64], приводящее к дальнейшему смещению нижних границ регистрируемых размеров в сторону увеличения. В таблице приведены расчетные оценки смещения границ диапазонов счетчика для показателя преломления сухого аэрозоля $n = 1,5$ и увлажненного аэрозоля $n = 1,42$ и $n = 1,38$, которые будут использованы нами в дальнейшем при анализе результатов измерений.

Изменение нижних границ диапазона АЗ-10 регистрируемых размеров аэрозоля в зависимости от показателя преломления частиц

$r_{lb, i, f}$, МКМ ($n = 1,6$)	$r_{lb, i, d}$, МКМ ($n = 1,5$)	$r_{lb, i, w}$, МКМ ($n = 1,42$)	$r_{lb, i, w}$, МКМ ($n = 1,38$)
0,15	0,17	0,19	0,20
0,2	0,22	0,25	0,26
0,25	0,27	0,30	0,32
0,5	0,51	0,53	0,54
1	1,05	1,13	1,14
2,5	2,68	2,85	2,93

Примечание. Индекс w – wet – увлажненные частицы.

Для описания конденсационной активности частиц разных размеров вводится фактор роста:

$$GF = \frac{r_w(RH = 80\%)}{r_d(RH = 0)} \quad (1)$$

где r_w – радиус частицы при некотором значении влажности; r_d – радиус сухой частицы.

В наших исследованиях для расчета фактора роста в качестве начальной влажности используется $RH = 40\%$, поскольку достигнуть нулевой влажности в эксперименте не всегда представляется возможным. В соответствии с методикой А.Г. Лактионова [41] необходимо выполнение следующих условий: близость конденсационной активности частиц одного размера; если $r_{1d} < r_{2d}$, то $r_{1w} < r_{2w}$; интегральные концентрации увлажненных частиц равны интегральным концентрациям сухих. Если указанные условия не выполнялись, результаты измерений не включались в анализ. Чаще всего это происходило при нестабильности концентрации аэрозоля в атмосфере во время измерений. Количество отбракованных данных в течение месяца мониторингового цикла составляло от 5 до 15%.

Применение методики иллюстрирует рис. 1. Здесь приведены интегральные концентрации «сухого» аэрозоля при $RH = 40\%$ и увлажненного при $RH = 80\%$, полученные при осреднении данных за 5–27 марта 2020 г. Параметр конденсационной активности η рассматривался в представленной формулы Кастена–Хенела [49, 50]:

$$\begin{aligned} r_{lb, i, w}(RH = 80\%) &= r_{lb, i, d}(RH = 0)(1 - 0,8)^{-\eta}, \\ r_{lb, i, w}(RH = 40\%) &= r_{lb, i, d}(RH = 0)(1 - 0,4)^{-\eta}, \end{aligned} \quad (2)$$

откуда из измерений при $RH = 40$ и 80%

$$\eta(r_{lb, i, d}) = \frac{-\ln(GF)}{\ln(1-0,8) - \ln(1-0,4)}, \quad (3)$$

где $GF = \frac{r_w(RH = 80\%)}{r_d(RH = 40\%)}$.

Вычисление η проводилось для диапазонов с границами $r_{lb, i, d}$, $r_{lb, i, w}(RH = 80\%, n = 1,38)$ и $r_{lb, i, w}(RH = 80\%, n = 1,42)$ с использованием интегральных концентраций $N(r > r_i)$. При $n = 1,38$ для значений нижних границ диапазонов 0,17; 0,22; 0,27; 0,51; 1,05; 2,68 мкм $\eta = 0,24$; 0,20; 0,19; 0,12; 0,07; 0,06, а при $n = 1,42$, соответственно, $\eta = 0,18$; 0,16; 0,15; 0,11; 0,06; 0,03.

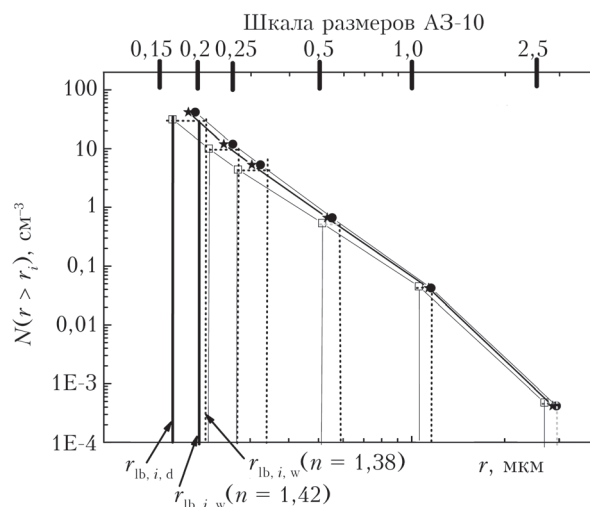


Рис. 1. Интегральные концентрации $N(r > r_i)$ сухого ($RH = 40\%$) (квадраты) и увлажненного аэрозоля ($RH = 80\%$) с $n = 1,38$ (точки) и $1,42$ (звездочки); по оси абсцисс приведены скорректированные значения $r_{lb, i, d}$ ($n = 1,5$) и $r_{lb, i, w}$ ($n = 1,38$ и $1,42$)

Отработка методики и регулярные (каждый час) круглосуточные измерения η с использованием фотоэлектрического счетчика были начаты в марте 2020 г. К сожалению, из-за эпидемиологических ограничений в конце апреля 2020 г. пришлось прервать начатый цикл регулярных измерений, и возобновить его удалось только в октябре. Измерения гигрограмм интегральным нефелометром ведутся с ноября 2019 г. Совместные измерения счетчиком и нефелометром проводились в октябре – декабре 2020 г. каждые 3 ч, а с января 2021 г. – каждые 4 ч. Всего было реализовано более 1800 синхронных циклов измерений счетчиком и интегральным нефелометром. После отбраковки данных для дальнейшего анализа было отобрано 1603 «гигрограммы» (интегральных концентраций $N(r > r_i)$ в зависимости от относительной влажности при ее изменении от 40 до 80%), по которым рассчитывался η .

Объемный коэффициент рассеяния аэрозоля нефелометром измерялся при фиксированных $RH = 40, 50, 60, 70, 80$ и 85% . Параметр конденса-

ционной активности для объемного коэффициента аэрозольного рассеяния γ_V рассчитывался по формуле Кастена–Хенела [49, 50]:

$$\sigma = \sigma_d(1 - RH)^{-TV}, \quad (4)$$

где σ – коэффициент аэрозольного рассеяния; σ_d – коэффициент рассеяния сухой основы аэрозоля.

Обсуждение и анализ результатов

На рис. 2 приведены среднемесячные значения η в диапазоне $r_{lb, i, d} = 0,17$ – $2,68$ мкм, рассчитанные по данным наблюдений с октября 2020 г. по июнь 2021 г. Как видим, с ростом размера частиц конденсационная активность убывает более чем на порядок величины. Напомним, что основная задача исследования заключается в разработке методики учета гигроскопических свойств частиц при восстановлении оптических характеристик аэрозоля, для которых важно знание поперечного сечения частиц $S(r)$. На рис. 2 отмечена область значений η , при которых увеличение $S(r)$ с ростом RH от 40 до 80% ($r_{lb, i, w}^2 / r_{lb, i, d}^2$) не превышает 5%.

Прежде чем приступить к анализу результатов эксперимента, необходимо обсудить методические аспекты, влияющие на неопределенность оценки η . Как уже отмечалось, при увеличении относительной влажности воздуха происходит заметное снижение показателя преломления частиц, что приводит к смещению нижних границ диапазонов ре-

гистрируемых размеров (см. таблицу). Значения $\eta(r_{lb, i, d})$ на рис. 2 были определены для $n = 1,38$ при $RH = 80\%$. Для оценки диапазона неопределенности значений $\eta(r_{lb, i, d})$ был проведен соответствующий расчет с $n = 1,42$ и выяснено, что при изменении показателя преломления с 1,38 до 1,42 отношение разности $\eta(1,38) - \eta(1,42)$ к их среднему значению с ростом размера частиц от 0,17 до 1 мкм снижается от ± 12 – 15 до ± 3 – 6% соответственно.

Более существенно на точность оценки η влияют вариации концентрации частиц во время измерений (в нашем случае измерение при фиксированной влажности длится 5–7 мин, весь цикл увлажнения занимает ~ 40 мин). Как видим на рис. 2, при $r_{lb, i, d} = 0,17$ мкм отношение среднеквадратического отклонения (СКО) к среднему значению η составляет 30%, а для частиц с $r > 0,5$ мкм оно превышает 100%. В первую очередь это обусловлено существенным снижением доли крупных частиц в спектре размеров и, следовательно, увеличением амплитуды их флуктуаций в атмосфере. Например, обратим внимание, что на рис. 2 результаты определения η в январском цикле ограничены диапазоном 0,17–0,51 мкм.

В январе 2021 г. погода в регионе определялась в основном малоподвижными антициклонными воздушными массами и среднемесячная температура была ниже -21 °С (этот месяц оказался одним из самых холодных за весь период наших наблюдений). В этих условиях в приземном слое

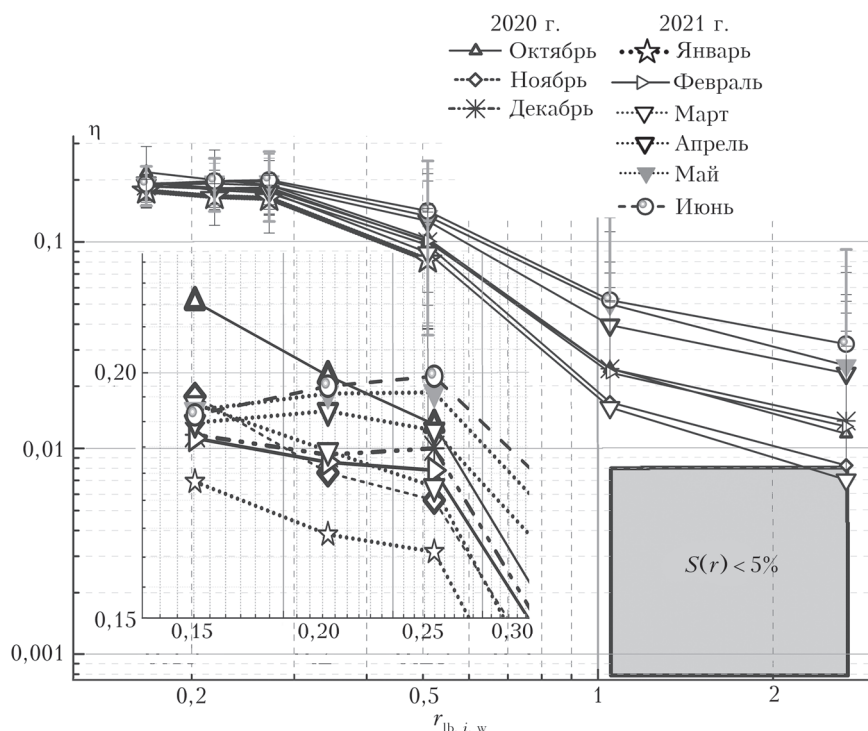


Рис. 2. Среднемесячные значения параметров конденсационной активности $\eta(r_{lb, i, d})$ по результатам измерений с октября 2020 г. по июнь 2021 г.

атмосферы наблюдалось минимальное (по сравнению с другими периодами) содержание частиц с $r > 1$ мкм, корректная оценка концентрации которых при ограниченном времени регистрации была практически невозможна. Поэтому из 98 реализаций только 17 оказались более или менее пригодными для оценки $\eta(1,05)$. Кроме того, при осреднении данных за месяц определен вклад в СКО, несомненно, вносят изменчивость физико-химических свойств аэрозоля при смене воздушных масс и их суточный ход.

Как показывают результаты, приведенные на рис. 2, практически для всех месяцев осенне-зимне-весеннего цикла (за исключением января) при расчете оптических характеристик необходим учет влияния влажности воздуха на частицы радиусом вплоть до $\sim 2,5$ мкм. Видно, что самые высокие значения η наблюдаются у частиц с $r = 0,167\text{--}0,22$ мкм. Величина η в этом диапазоне варьируется в небольших пределах, от 0,22 в октябре 2020 г. до 0,17 в январе 2021 г. Снижение η с увеличением радиуса частиц характерно для всех месяцев. Напомним, что подобная зависимость $\eta(r)$ в регистрируемом нами диапазоне размеров частиц соответствует ранее полученным данным других авторов.

На рис. 3, а приведен ход отношения $\eta(0,17)/\eta(0,51)$ для периода январь – июнь. Здесь же представлен многолетний среднемесячный ход отношения концентрации в диапазоне $r = 0,2\text{--}0,5$ мкм (N_f) к концентрации в диапазоне $r > 0,5$ мкм (N_c). В 2010–2017 гг. заметно снижается параметр $\eta(0,17)/\eta(0,51)$ и значительно уменьшается относительная доля частиц с $r = 0,2\text{--}0,5$ мкм по сравнению с $r > 0,5$. Нарушают тенденцию снижения среднемесячных значений $\eta(0,17)/\eta(0,51)$ лишь данные наблюдений в марте. Ранее на основе многолетних наблюдений параметра конденсационной активности для коэффициента направленного рассеяния под углом 45° (γ_{45}) [65] было выявлено, что именно в этот период года наблюдаются максимум его абсолютных значений и наиболее сильная изменчивость гигроскопических свойств аэрозоля в разных атмосферных условиях. На рис. 3, б приведен график среднесуточных значений отношения счетной концентрации субмикронных частиц к концентрации грубодисперсных N_f/N_c и текущих значений γ_V в марте 2021 г., и здесь отчетливо видна такая же, как и на рис. 3, а, закономерность: в ситуациях с максимальными значениями N_f/N_c величина γ_V также максимальна и наоборот.

В настоящей работе обсуждаются результаты только одного цикла исследований $\eta(r)$, поэтому неизбежно возникает вопрос о том, в какой мере свойства аэрозоля, реализующиеся в течение этого периода, были сопоставимы с данными многолетних измерений аэрозольных характеристик в нашем пункте. Для выяснения этого вопроса сравним (рис. 4) параметр конденсационной активности

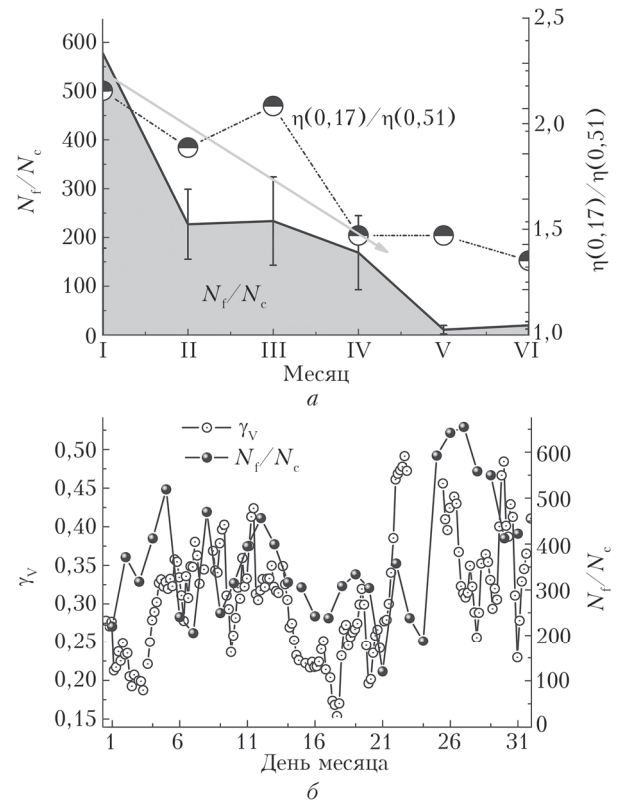


Рис. 3. Среднемесячные значения относительного содержания мелких частиц (N_f/N_c) по данным мониторинговых измерений 2010–2017 гг. и параметра $\eta(0,17)/\eta(0,51)$ в период январь – июнь 2021 г. (а); среднесуточные значения N_f/N_c и текущие значения γ_V в марте 2021 г. (б)

аэрозоля γ_{45} за все время регулярных наблюдений, ведущихся с 1998 г., γ_V за анализируемый нами период (октябрь 2020 г. – июнь 2021 г.) и отношение $\eta(0,17)/\eta(0,51)$. Как видим, основные особенности временного хода сравниваемых параметров γ_{45} и γ_V за октябрь – июнь хорошо согласуются (коэффициент корреляции свыше 99%) и воспроизводят выявленные ранее характерные черты годового хода γ_{45} [65]: максимум в марте – апреле, снижение от весны к лету, возрастание осенью и еще один минимум в декабре – феврале. Это позволяет полагать, что наблюдавшиеся с октября 2020 г. по июнь 2021 г. атмосферные условия и оптические и микрофизические свойства аэрозольных частиц соответствуют тем, что наиболее часто реализуются в атмосфере региона в рассматриваемый период.

Обратим внимание, что γ_{45} в $\sim 1,3$ раза больше, чем γ_V . Этот факт вполне объясним и в определенной степени подтверждает результаты нашего исследования параметров конденсационной активности $\eta(r)$ (рис. 2). Ранее было показано, что измеряемый нефелометром под углом 45° коэффициент рассеяния определяется частицами с $r = 0,07\text{--}0,7$ мкм, вклад которых составляет свыше 90% [48]. Известно, что объемный коэффициент рассеяния в видимой области спектра в диапазоне углов

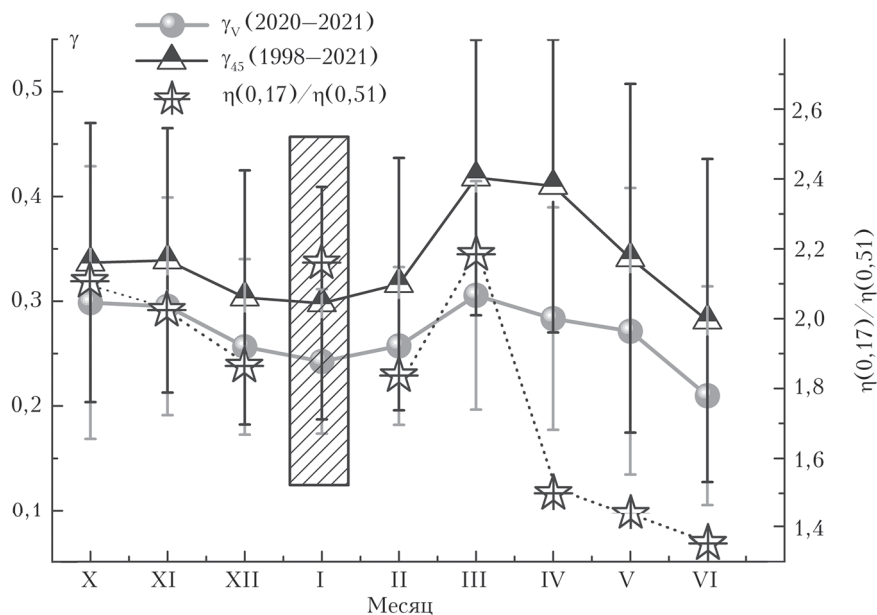


Рис. 4. Среднемесячные значения и СКО параметров конденсационной активности γ_{45} и γ_V и отношения параметров конденсационной активности $\eta(0,17)/\eta(0,51)$

10–170° формируется более широким распределением субмикронных частиц по размерам [66, 67]. Как следует из представленных в настоящей работе данных (см. рис. 2), по мере увеличения размера частиц их конденсационная активность снижается. Следовательно, γ_{45} определяется частицами с более высокой конденсационной активностью. В свою очередь, при увеличении относительной влажности воздуха возрастает вклад крупных частиц в формирование объемного коэффициента рассеяния, а они обладают значительно меньшей конденсационной активностью. Значит, γ_V всегда будет меньше, чем γ_{45} .

Также эти выводы вполне подтверждаются временным ходом $\eta(0,17)/\eta(0,51)$. Анализируя данные с октября по июнь в целом (рис. 4), отметим, что изменение конденсационной активности оптических коэффициентов направленного и объемного рассеяния в этот период определяется следующим процессом: при снижении относительного содержания мелких частиц (уменьшение N_f/N_c на рис. 3) возрастает влияние более крупных, имеющих более низкую конденсационную активность, и наоборот, с ростом N_f/N_c усиливается роль частиц с высокими значениями η .

Появление высокого значения отношения $\eta(0,17)/\eta(0,51)$ в массиве январских данных за 2021 г. при относительно низких значениях γ_{45} и γ_V рассмотрим особо. В этом месяце были зарегистрированы самые низкие величины η во всем диапазоне размеров частиц (см. рис. 2), что вполне согласуется со снижением параметров конденсационной активности для коэффициентов направленного и объемного рассеяния. Но невысокими значениями $\eta(0,17)$ и $\eta(0,51)$ при их высоком СКО в данном случае обусловлена большая погрешность в определении отношения $\eta(0,17)/\eta(0,51)$ (СКО > 50%).

Заключение

В работе представлены первые результаты изучения конденсационной активности частиц разных размеров с применением фотоэлектрического счетчика в 2020–2021 гг. На основе совместного анализа полученных данных о функции распределения частиц по размерам при влажности воздуха 40 и 80% и параметров конденсационной активности аэрозоля для коэффициента рассеяния под углом 45° и объемного коэффициента рассеяния показано, что атмосферные условия и состояние аэрозоля в период проведения измерений соответствовали наиболее типичным, которые реализуются в атмосфере региона в рассматриваемый период.

Этот факт позволяет полагать, что уже на данном этапе появляется возможность наметить пути совершенствования блока учета влажности в эмпирической региональной модели, а продолжение этих работ позволит определить сезонный и суточный ход конденсационной активности частиц разных размеров.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Патрику Шеридану (Patrick Sheridan, NOAA Global Monitoring Laboratory) за предоставленный интегральный нефелометр M903 и В.П. Шмаргунову (ЛОА ИОА СО РАН) за создание аппаратно-программного комплекса для синхронных измерений гигрограмм нефелометром и фотоэлектрическим счетчиком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 19-77-20092).

1. 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.
2. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства

- аэрозоля различных типов // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 1. С. 5–24.
3. *Ивлев Л.С.* Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
 4. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 2nd Edition. New York: Wiley-Interscience, 2006.
 5. *Jaenicke R.* Atmospheric aerosol and global climate // *J. Aerosol Sci.* 1980. V. 11. P. 577–588.
 6. *Lohmann U., Feichter J.* Global indirect aerosol effects: a review // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 715–737.
 7. *Meszaros A.* On the variation of the size distributions of large and giant particles as a function of the relative humidity // *Tellus A.* 1971. V. 23, N 4–5. P. 436–440.
 8. *Chen Y., Wild O., Wang Y., Rand L., Teich M., Grossb J., Wangb L., Spindler G., Herrmann H., van Pinxteren D., McFiggans G., Wiedensohler A.* The influence of impactor size cut-off shift caused by hygroscopic growth on particulate matter loading and composition measurements // *Atmos. Environ.* 2018. V. 195. P. 141–148.
 9. *Neubauer K.R., Johnston M.V., Wexler A.S.* Humidity effects on the mass spectra of single aerosol particles // *Atmos. Environ.* 1998. V. 32, N 14/15. P. 2521–2529.
 10. *Mikhailov E.F., Vlasenko S.S., Rose D., Poschl U.* Mass-based hygroscopicity parameter interaction model and measurement of atmospheric aerosol water uptake // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 717–740.
 11. *Rader D.J., McMurry P.H.* Application of the Tandem Differential Mobility Analyzer to studies of droplet growth and evaporation // *J. Aerosol Sci.* 1986. V. 17. P. 771–787.
 12. *Vlasenko S., Su H., Pöschl U., Andreae M., Mikhailov E.* Tandem configuration of differential mobility and centrifugal particle mass analysers for investigating aerosol hygroscopic properties // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 1269–1280.
 13. *Strapp J.W., Leaitch W.R., Liu P.S.K.* Hydrated and dried aerosol size distribution measurements from the particle measuring systems FSSP-300 probe and the deiced PCASP-100X probe // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1992. V. 9. P. 548–555.
 14. *Petters M.D., Prenni A.J., Kreidenweis S.M., DeMott P.J.* On measuring the critical diameter of cloud condensation nuclei using mobility selected aerosol // *Aerosol Sci. Technol.* 2007. V. 41. P. 907–913.
 15. *Rovelli G., Miles R.E.H., Reid J.P., Clegg S.L.* Accurate measurements of aerosol hygroscopic growth over a wide range in relative humidity // *J. Phys. Chem.* 2016. V. A120. P. 4376–4388.
 16. *Chen J., Zhao C., Ma N., Puzhen Y.* Aerosol hygroscopicity parameter derived from the light scattering enhancement factor measurements in the North China Plain // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2014. V. 14. P. 8105–8118.
 17. *Kuang Y., Zhao C.S., Zhao G., Tao J.C., Xu W., Ma N., Bian Y.X.* A novel method for calculating ambient aerosol liquid water content based on measurements of a humidified nephelometer system // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. P. 2967–2982.
 18. *Терпугова С.А., Панченко М.В., Свириденков М.А., Докукина Т.А.* Соотношения между оптическими и микрофизическими параметрами конденсационной изменчивости приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 629–634;
 - Terpugova S.A., Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Dokukina T.A.* Relationships between the optical and microphysical parameters of near-ground aerosol condensation activity // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 4. P. 405–412.
 19. *Wang Z., Cheng Y., Ma N., Mikhailov E.F., Pöschl U., Su H.* Dependence of the hygroscopicity parameter κ on particle size, humidity and solute concentration: Implications for laboratory experiments, field measurements and model studies // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2017. P. 253–286.
 20. *Liu Q., Jing B., Peng C., Tong S., Wang W., Ge M.* Hygroscopicity of internally mixed multi-component aerosol particles of atmospheric relevance // *Atmos. Environ.* 2016. V. 125. P. 69–77.
 21. *Liu H.J., Zhao C.S.* Aerosol hygroscopicity derived from size-segregated chemical composition and its parameterization in the North China Plain // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 8. P. 20885–20922.
 22. *Gysel M.* Closure between chemical composition and hygroscopic growth of aerosol particles during TORCH2 // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 24. P. 6131–6144.
 23. *Zhang X., Massoli P., Quinn P.K., Bates T.S., Capra C.D.* Hygroscopic growth of submicron and supermicron aerosols in the marine boundary layer // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119. P. 8384–8399.
 24. *Исаков А.А., Тихонов А.В.* О сопоставлении осредненных направлений прихода в Подмосквовые воздушных масс со средними величинами параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 9–13; *Isakov A.A., Tikhonov A.V.* On the comparison of the average arrival directions of air masses in the Moscow region versus the average hanel parameters and average particle refractive indices // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 3. P. 169–173.
 25. *Исаков А.А., Тихонов А.В.* Связь параметров аэрозоля Центральной России с воздушными массами // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 192–196; *Isakov A.A., Tikhonov A.V.* Relationship between aerosol parameters and air masses in Central Russia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 4. P. 475–478.
 26. *Bougatioti A., Nenes A., Fountoukis C., Kalivitis N., Pandis S.N., Mihalopoulos N.* Size-resolved CCN distributions and activation kinetics of aged continental and marine aerosol // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 8791–8808.
 27. *Petters M.D., Carrico C.M., Kreidenweis S.M., Prenni A.J., DeMott P.J., Collett Jr.J.L., Moosmuller H.* Cloud condensation nucleation activity of biomass burning aerosol // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D22205.
 28. *Paramonov M., Aalto P.P., Asmi A., Prisle N., Kerminen V.-M., Kulmala M., Petäjä T.* The analysis of size-segregated cloud condensation nuclei counter (CCNC) data and its implications for cloud droplet activation // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 10285–10301.
 29. *Hegg D.A., Covert D.S., Jonsson H.H.* Measurements of size-resolved hygroscopicity in the California coastal zone // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2008. V. 8. P. 10531–10560.
 30. *Mikhailov E.F., Mironov G.N., Pöhlker C., Chi X., Krüger M.L., Shiraiwa M., Förster J.-D., Pöschl U., Vlasenko S.S., Ryshkevich T.I., Weigand M., McCoyne A.L.D., Andreae M.O.* Chemical composition, microstructure, and hygroscopic properties of aerosol particles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO), Siberia, during a summer campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 8847–8869.

31. Михайлов Е.Ф., Иванова О.А., Власенко С.С., Небосько Е.Ю., Рышкевич Т.И. Измерения конденсационной активности ядер Айткена в пригороде Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2017. Т. 53, № 3.С. 1–9.
32. Kecorius S., Madueco L., Vallar E., Alas H., Betito G., Birmili W., Cambaliza M.O., Catipay G., Gonzalez-Cayetano M., Galvez M.C., Lorenzo G., Müller T., Simpas J.B., Tamayo E.G., Wiedensohler A. Aerosol particle mixing state, refractory particle number size distributions and emission factors in a polluted urban environment: Case study of Metro Manila, Philippines // Atmos. Environ. 2017. V. 170. P. 169–183.
33. Cocker D.R.III, Whitcock N.E., Flagan R.C., Seinfeld J.H. Hygroscopic properties of Pasadena, California, aerosol // Aerosol Sci. Technol. 2001. V. 35. P. 637–647.
34. Adam M., Putaud J.P., Martins dos Santos S., Dell'Acqua A., Gruening C. Aerosol hygroscopicity at Ispra EMEP-GAW station // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2012. V. 12. P. 5293–5340.
35. Rissler J., Vestin A., Swietlicki E., Fisch G., Zhou J., Artaxo P., Andreae M.O. Size distribution and hygroscopic properties of aerosol particles from dry-season biomass burning in Amazonia // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2005. V. 5. P. 8149–8207.
36. Zhou J., Swietlicki E., Berg O., Aalto P., Hämeri K., Nilsson E., Leck C. Hygroscopic properties of aerosol particles over the central Arctic Ocean during summer // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N D23. P. 32111–32123.
37. Koehler K.A., Kreidenweis S.M., DeMott P.J., Petters M.D., Prenni A.J., Carrico C.M. Hygroscopicity and cloud droplet activation of mineral dust aerosol // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L08805.
38. Рышкевич Т.И., Миронов Г.Н., Миронова С.Ю., Власенко С.С., Чу Х., Андреае М.О., Михайлов Е.Ф. Сравнительный анализ гигроскопических свойств атмосферных аэрозолей по данным летней и зимней экспедиций 2011 года на Сибирской фоновой станции ZOTTO // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 5. С. 578–586.
39. Levin E.J.T., Prenni A.J., Petters M.D., Kreidenweis S.M., Sullivan R.C., Atwood S.A., Ortega J., DeMott P.J., Smith J.N. An annual cycle of size-resolved aerosol hygroscopicity at a forested site in Colorado // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. D06201.
40. Graham B., Guyon P., Maenhaut W., Taylor P.E., Ebert M., Matthias-Maser S., Mayol-Bracero O.L., Godoi R.H.M., Artaxo P., Meixner F.X., Moura M.A.L., Rocha C., van Grieken R., Glovsky M.M., Flagan R.C., Andreae M.O. Composition and diurnal variability of the natural Amazonian aerosol // J. Geophys. Res.: Atmos. 2003. V. 108. P. 4765.
41. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 160 с.
42. Petters M.D., Kreidenweis S.M. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 8. P. 1961–1971.
43. Petters M.D., Kreidenweis S.M. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity – Part 3: Including surfactant partitioning // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 1081–1091.
44. Häkkinen S.A.K., Manninen H.E., Yli-Juuti T., Merikanto J., Kajos M.K., Nieminen T., D'Andrea S.D., Asmi A., Pierce J.R., Kulmala M., Riipinen I. Semi-empirical parameterization of size-dependent atmospheric nanoparticle growth in continental environments // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 7665–7682.
45. Herbert F., Wacker U. Parameterization of the CCN-humidity spectrum in dependency on nucleation conditions and aerosol size distribution // Meteorol. Atmos. Phys. 1998. V. 66. P. 213–220.
46. Topping D.O., McFiggans G.B., Coe H. A curved multicomponent aerosol hygroscopicity model framework: Part 1 – Inorganic compounds // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 1205–1222.
47. Груздев А.Н., Исаков А.А., Шукурова Л.М. Анализ связи конденсационной активности приземного аэрозоля с его химическим составом и относительной влажностью воздуха по измерениям на Звенигородской научной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 978–984; Gruzdev A.N., Isakov A.A., Shukurova L.M. Analysis of relationship between condensation activity of surface aerosol and its chemical composition and relative air humidity according to measurements at the Zvenigorod scientific station // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 2. P. 169–175.
48. Панченко М.В., Свириденков М.А., Терпугова С.А., Козлов В.С. Активная спектрофелометрия в исследовании микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 5–6. С. 428–436.
49. Kasten F. Visibility forecast in the phase of precondensation // Tellus. 1969. V. 21. P. 631–635.
50. Hänel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Adv. Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.
51. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшкин 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 атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
52. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Terpugova S.A., Polkin V.V., Kozlov V.S. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5, N 7. P. 1513–1527.
53. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Kozlov V.S., Chernov D.G. Modeling of aerosol radiation-relevant parameters in the troposphere of Siberia on the basis of empirical data // Atmosphere. 2018. V. 9, N 11. P. 414–430.
54. Зенкова П.Н., Терпугова С.А., Польшкин В.В., Польшкин Вас.В., Ужegov В.Н., Козлов В.С., Яушева Е.П., Панченко М.В. Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 3. С. 192–198; Zenkova P.N., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V., 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.
55. Польшкин 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.
56. Аэрозольная станция ИОА СО РАН. URL: <http://aerosol.iao.ru>. (дата обращения: 6.09.2021).

57. Панченко М.В., Курьшев С.П., Шмаргунов В.П., Терпугова С.А. Автоматизированный увлажнитель для исследования свойств аэрозоля при изменении относительной влажности // Аэрозоли Сибири. XXVI Конф.: Тез. докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2019. С. 87.
58. Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10-0. URL: <https://eco-intech.com/product/schetchik-chastits-az-10/> (дата обращения: 6.09.2021).
59. Козлов В.С., Полькин В.В., Фадеев В.Я. Влияние неопределенности оптических постоянных на точность фотоэлектрических счетчиков аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1982. Т. 18, № 4. С. 428–431.
60. Quenzel H. Influence of refractive index on the accuracy of size determination of aerosol particles with light scattering aerosol counters // Appl. Opt. 1969. V. 8, N 1. P. 165–169.
61. Cooke D., Kerker M. Response calculations for light scattering aerosol particle counters // Appl. Opt. 1975. V. 14, N 3. P. 734–739.
62. Heyder J., Gebhart J. Optimization of response functions of light scattering instruments for size evaluation of aerosol particles // Appl. Opt. 1979. V. 18, N 5. P. 705–711.
63. Hodkinson J.R., Grenfield J.R. Response calculations for light scattering aerosol counters and photometers // Appl. Opt. 1965. V. 4, N 11. P. 1463–1474.
64. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
65. 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 атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
66. Горчаков Г.И., Емленко А.С., Исаков А.А., Свириденков М.А. Коэффициент направленного светорассеяния в области углов 0,5–170° // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1976. Т. 12, № 10. С. 1034–1044.
67. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.

V.V. Pol'kin, M.V. Panchenko, S.A. Terpugova. Condensation activity of atmospheric aerosol particles of different size as assessed from the data of an optical counter.

The results of experimental study of the condensation activity of particles of different size carried out in October 2020 till June 2021 with use of an AZ-10 optical counter, equipped with a system for artificial humidification of atmospheric aerosol collected, are considered. Hygrograms of the total aerosol scattering coefficient were simultaneously measured with a M903 integral nephelometer. The atmospheric conditions and aerosol characteristics during the measurement period were typical, which was confirmed from the comparison with long-term series of the condensation activity parameter for the scattering coefficient at an angle of 45°.