

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.510.42+551.501.793

Динамика микрофизических параметров пиролизного дыма по результатам обращения коэффициентов аэрозольного рассеяния и ослабления в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН

В.В. Веретенников[✉], В.Н. Ужегов, В.П. Шмаргунов*

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

Поступила в редакцию 5.12.2022 г.;
после доработки 1.08.2023 г.;
принята к печати 2.10.2023 г.

Исследована временная изменчивость микрофизических параметров пиролизного дыма, восстановленных при обращении характеристик аэрозольного рассеяния и ослабления. В дымовом аэрозоле, полученном в результате термического разложения древесины сосны в режиме низкотемпературного пиролиза в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН, проведены измерения поляризационных индикатрис рассеяния и спектральных коэффициентов ослабления. С помощью разработанного алгоритма обращения данных оптических измерений восстановлены микроструктура и комплексный показатель преломления пиролизного дыма. В качестве анализируемых параметров микроструктуры рассматривались объемная концентрация и средний радиус частиц с разделением на субмикронную и грубодисперсную фракции. Исследована временная изменчивость микрофизических параметров дымового аэрозоля в течение 65 ч. Установлено, что вещественная часть показателя преломления находится в окрестности $n = 1,55$, мнимая часть заключена в интервале $0,007 < k < 0,009$. Средний радиус субмикронных частиц изменяется в узком диапазоне 0,137–0,146 мкм. В процессе старения дыма средний радиус частиц суммарного ансамбля монотонно возрастал от 0,19 до 0,6 мкм преимущественно за счет относительного увеличения содержания грубодисперсного аэрозоля. Данные о комплексном показателе преломления и размерах дымовых частиц важны для оценки радиационного форсинга аэрозоля, совершенствования климатических моделей и алгоритмов оптического дистанционного зондирования.

Ключевые слова: пиролизный дым, поляризационная спектрофелометрия, коэффициент ослабления, обратная задача, параметры микроструктуры, комплексный показатель преломления; pyrolysis smoke, polarization spectrophelometry, extinction coefficient, inverse problem, microphysical parameters, complex index of refraction.

Введение

В течение последних десятилетий во многих регионах планеты, включая территорию Сибири и Дальнего Востока, наблюдается значительный рост частоты и интенсивности природных пожаров (см., например, [1–8]). Одним из негативных последствий происходящего при этом термического разложения горючих материалов является образование и вынос в атмосферу огромной массы дымовых частиц. Как составная часть атмосферного аэрозоля дымовые частицы существенно влияют на окружающую среду и здоровье человека [1, 9–19]. Рас-

сеивая и поглощая оптическое излучение, дымовой аэрозоль участвует в формировании радиационного баланса атмосферы и земной поверхности, влияет на состояние погоды и климатические процессы [20–27].

Для оценки последствий воздействия дымового аэрозоля на состояние окружающей среды необходимо изучение его свойств, которые зависят от множества факторов, таких как состав горючих материалов, температурный режим горения, механизмы образования и трансформации частиц и др. Разнообразие трудноконтролируемых факторов, определяющих свойства дымового аэрозоля — причина большой неопределенности при оценке его роли в изменении окружающей среды.

Важное место в изучении свойств дымовых аэрозолей занимают лабораторные исследования процессов образования и трансформации аэрозолей в контролируемых условиях [28–37].

* Виктор Васильевич Веретенников (vvv@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

В числе ранних работ можно отметить лабораторные эксперименты [28], в которых были определены оптические и гигроскопические свойства дымовых аэрозолей, образующихся в закрытой камере при тлеющем горении образцов древесины (ель, бук) и торфа из Индонезии и Северной Германии. Тлеющие лесные и торфяные пожары являются важным источником поступления в атмосферу «коричневого углерода» (brown carbon, BrC) [29, 30]. Авторами [28] исследована зависимость коэффициентов аэрозольного рассеяния ($\lambda \sim 0,545$ мкм) от относительной влажности воздуха, которая показала низкую гигроскопичность дымовых частиц. Также определено альbedo однократного рассеяния, равное 0,95 для образцов древесины и 0,99 при тлеющем горении торфа.

В статье [30] исследовано спектральное поглощение света органическим углеродом (ОС), образующимся в камере сгорания в процессе пиролиза образцов древесины различного типа (сосна, дуб) и размера при изменении температуры нагрева древесины от 210 до 360 °С (состояния, близкого к воспламенению). Установлено, что более высокая температура древесины — основной фактор, создающий ОС с более высоким поглощением, которое увеличивается с уменьшением длины волны.

В исследовании [31] дымовой аэрозоль создавался в камере большого объема (~ 3300 м³) в результате тлеющего горения частично разложившейся подстилки хвойных лесов США (Монтана, Аляска) и состоял преимущественно из почти сферических шариков смоляных частиц аморфного углеродистого материала. Оптические характеристики дымовых частиц измерялись с помощью интегрирующих фотоакустических нефелометров (IPN) на длинах волн видимого (0,405 и 0,532 мкм) и ближнего ИК- (0,78 мкм) диапазонов спектра. Также определялись распределения счетной концентрации частиц по размерам с использованием электрического импактора низкого давления (ELPI). Показано, что распределения частиц по диаметру имеют узкий пик в окрестности 0,07 мкм. На основе данных о размерах смоляных частиц, измерений их характеристик рассеяния и поглощения определены спектральные зависимости комплексного показателя преломления дымовых частиц.

В экспериментах [32] изучены оптические свойства и микроструктура дымовых аэрозолей, которые образуются при тлеющем горении образцов бореальных торфяников, собранных во внутренних районах Аляски и Западной Сибири. Исследуемые образцы сжигались в камере при влажности топлива 25 и 50%. Установлено, что в массовом содержании дымовых частиц доминирует BrC с незначительным содержанием «черного углерода» (black carbon, BC [16]). С помощью многоволновых интегрирующих фотоакустических нефелометров (IPNs) были измерены коэффициенты рассеяния и поглощения дыма и определено альbedo однократного рассеяния на четырех длинах волн: 0,405; 0,532; 0,781 и 0,87 мкм. Спектральная изменчивость массового коэффициента поглощения и альbedo однократного рассеяния согласуются с зависимостями, характер-

ными для BrC с сильным поглощением в ближнем УФ-диапазоне длин волн. С помощью сканирующего анализатора подвижности частиц (SMPS, TSI, Inc.) получено распределение счетной концентрации дымовых частиц. Показано, что с увеличением влажности торфа уменьшаются общая концентрация частиц и их медианный диаметр.

В работах [33, 34] представлены результаты лабораторных исследований оптико-микрофизических свойств дымовых аэрозолей, которые образуются при тлеющем горении образцов торфа, отобранных в различных частях Аляски и Индонезии. Пробы торфа нагревались в закрытой камере до температуры 245 °С, при которой происходила эмиссия BrC. В ходе лабораторных экспериментов одновременно измерялись коэффициенты аэрозольного рассеяния и поглощения в спектральном диапазоне 0,375–1,047 мкм с помощью интегрирующих фотоакустических нефелометров, а также функции распределения счетной концентрации аэрозоля с использованием сканирующего анализатора подвижности частиц (SMPS, TSI, Inc.). Полученные данные о микроструктуре аэрозоля и его оптических характеристиках применялись для восстановления комплексного показателя преломления (КПП) $m = n - i \cdot k$ BrC путем решения обратной задачи на основе теории Ми. В результате установлено, что вещественная часть n заключена между 1,5 и 1,7 при отсутствии выраженной зависимости от длины волны λ ; мнимая часть k характеризуется существенным возрастанием (от 0,003 до 0,014) при переходе из видимой в УФ-область.

Оптико-микрофизические характеристики аэрозолей, образующихся в результате термического воздействия на древесные материалы, исследовались в ИОА СО РАН в замкнутом объеме малогабаритной камеры [35] и в Большой аэрозольной камере (БАК) [36–37]. Оптические измерения проводились поляризационным спектронефелометром [35–37]. Для восстановления микроструктуры и комплексного показателя преломления дымов использовался регуляризирующий алгоритм на основе минимизации сглаживающего функционала для спектральных и угловых измерений ортогонально поляризованных компонент коэффициента направленного светорассеяния [38]. В результате многолетних исследований накоплен обширный массив экспериментальных данных об изменчивости характеристик дымовых аэрозолей, например, в зависимости от вида и массы образцов древесины, режима их термического разложения, относительной влажности воздуха. В настоящее время в дополнение к исследованиям поляризационных характеристик дымового аэрозоля в локальном объеме измеряются спектральные коэффициенты аэрозольного ослабления с использованием трассового измерителя прозрачности атмосферы [39, 40]. Это позволяет расширить информационную базу при изучении оптико-микрофизических свойств дымов.

Цель настоящей работы — разработка и апробация методики совместного обращения поляризационных индикатрис рассеяния и спектральных измерений коэффициента ослабления света при восста-

новлении временной изменчивости микроструктуры и КПП дымового аэрозоля, образующегося в режиме пиролиза древесины в БАК ИОА СО РАН.

1. Эксперимент

Дымовой аэрозоль создавался в результате термического разложения (пиролиза) хвойных сортов древесины (сосна; 30,5 г) в муфельной печи, которая нагревалась до температуры 400 °С, после чего загружался горючий материал. В течение 1,5 ч дым белого цвета поступал в относительно холодную ($T = 20\text{--}22\text{ °C}$) аэрозольную камеру объемом $\sim 1800\text{ м}^3$, где перемешивался. После равномерного заполнения камеры дымом муфельная печь выключалась. Измерения оптических характеристик проводились в режиме естественного старения дымового аэрозоля в течение 65 ч. Относительная влажность воздуха в камере изменялась за это время от 34 до 39%.

Коэффициенты направленного светорассеяния $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$ измерялись поляризационным спектрофелометром для пяти углов рассеяния ($\theta = 15, 45, 110, 135$ и 165°) на четырех длинах волн ($\lambda = 0,46; 0,53; 0,59$ и $0,63\text{ мкм}$) и двух ортогональных состояний поляризации [36, 37, 40]. Длительность единичного цикла измерений составляла 3–7 мин.

Для примера на рис. 1 показан временной ход поляризационных индикатрис рассеяния пиролизного дыма при фиксированном $\theta = 45^\circ$. Отсчеты по оси абсцисс N соответствуют интервалу измерений 30 мин. Начиная с $N = 4$ представленные зависимости приобретают убывающий экспоненциальный вид. Изменчивость соотношений между спектральными компонентами поляризационных индикатрис свидетельствует о трансформации микрофизических характеристик дыма с течением времени. Аналогичная картина наблюдается и для других углов рассеяния.

Оценка погрешности измерений $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$ по методике [41] показала, что среднеквадратическая погрешность варьирует в зависимости от λ и θ в диапазоне от $0,51\text{E-}4$ до $0,49\text{E-}2\text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Абсолютная погрешность поляризационных измерений уменьшается с увеличением длины волны для всех углов рассеяния. Для индивидуальных измерений максимальная по λ и θ относительная погрешность не превышает 1% на начальной стадии эксперимента и увеличивается до 6% в его конце ($N = 132$).

Коэффициент ослабления света $\epsilon(\lambda)$ измерялся трассовым спектрофотометром [39, 40] на 12 длинах волн в диапазоне $0,45\text{--}3,91\text{ мкм}$. Трассовый измеритель прозрачности атмосферы был модернизирован для использования в БАКе [40].

Приемопередающая система и зеркальный отражатель трассового измерителя располагаются

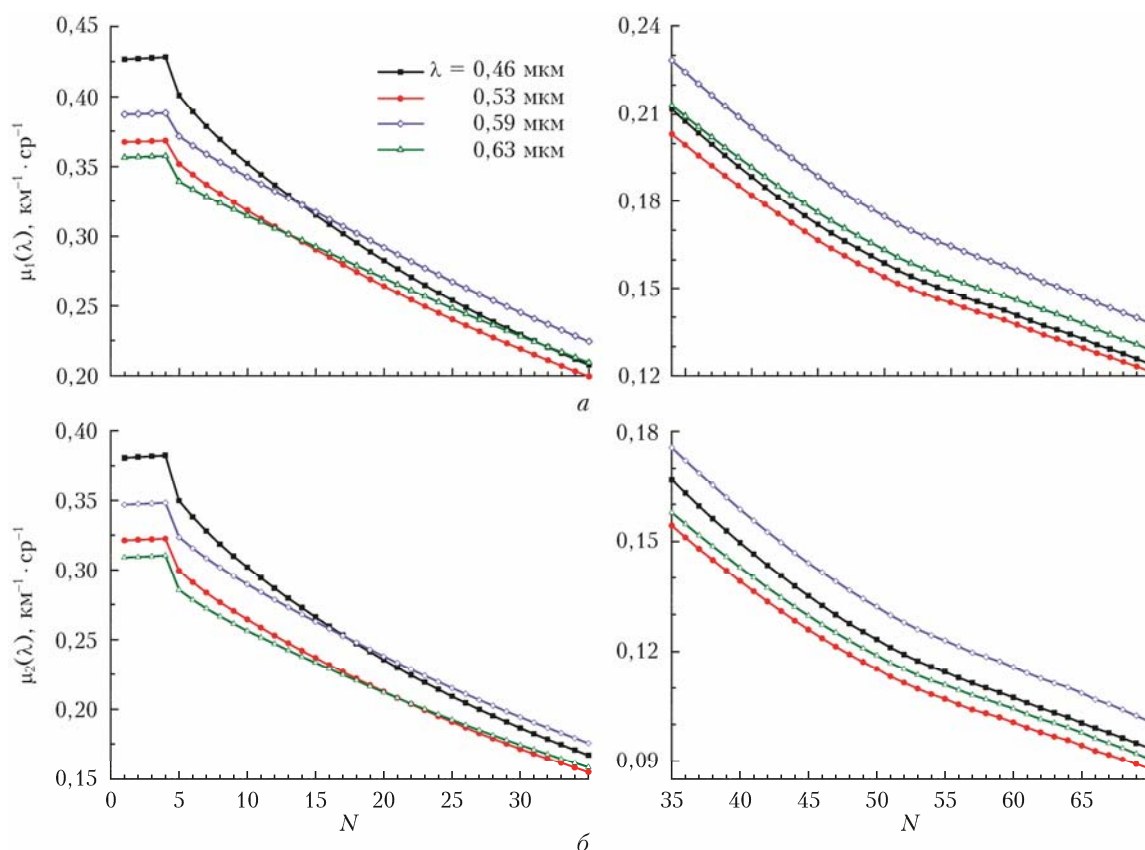


Рис. 1. Временные ряды ортогонально поляризованных компонент коэффициента направленного светорассеяния (поляризационных индикатрис) пиролизного дыма $\mu_1(\theta, \lambda)$ (а) и $\mu_2(\theta, \lambda)$ (б) для угла рассеяния $\theta = 45^\circ$ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

на противоположных сторонах камеры за кварцевыми иллюминаторами. Измерительная трасса проходит вдоль большой оси камеры на высоте 2 м (высота расположения пробоотборника в системе отбора воздуха спектрофелометра). Расстояние между отражателем и приемопередающей системой 26 м, общая длина трассы 52 м.

На рис. 2 представлена динамика коэффициента ослабления света в видимой области спектра. Анализ погрешности измерений $\varepsilon(\lambda)$ показал, что в видимом и ближнем ИК-диапазоне ($\lambda \leq 0,94$ мкм) абсолютная погрешность заключена в пределах $0,04$ – $0,07$ км $^{-1}$; начиная с $\lambda = 1,06$ мкм она значительно увеличивается (до $0,14$ км $^{-1}$ и выше). В течение эксперимента относительная погрешность измерений $\varepsilon(\lambda)$ растет, изменяясь, в частности, в интервалах $0,8$ – $2,2\%$ при $\lambda = 0,45$ мкм и $7,8$ – $12,4\%$ при $\lambda = 1,25$ мкм.

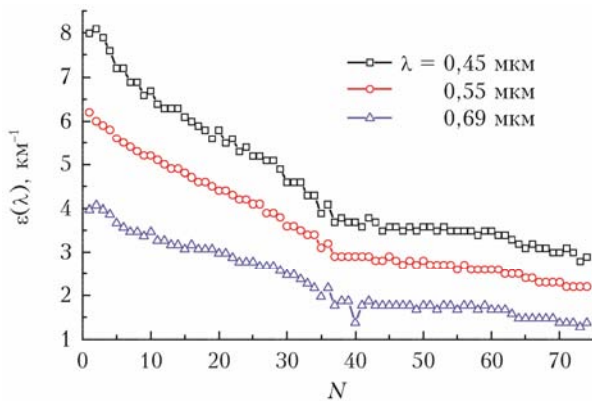


Рис. 2. Временные ряды измерений коэффициента ослабления света пиролизным дымом в видимой области спектра (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Данные измерений коэффициентов направленного светорассеяния (поляризационных индикатрис $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$ и коэффициентов ослабления $\varepsilon(\lambda)$) использовались для определения микроструктуры и КПП $m = n - i \cdot \kappa$ дымовых аэрозолей. С этой целью разработаны алгоритмы обращения данных оптических измерений, в которых при описании микроструктуры аэрозоля рассматривается интегральная функция распределения частиц по размерам $S(r)$, характеризующая геометрическое сечение частиц радиусом не менее r в единичном объеме среды [42].

2. Методика решения обратной задачи

Задача совместного определения функции $S(r)$ и КПП $m = (n, \kappa)$ в общем случае сводится к решению системы операторных уравнений

$$Q_f(n, \kappa)S = f, \quad f = \{\mu_1(\theta, \lambda), \mu_2(\theta, \lambda), \varepsilon(\lambda)\} \quad (1)$$

путем минимизации по S и m функционалов невязки для этих уравнений

$$F_f^2(S, m) = \|Q_f(n, \kappa)S - f\|^2. \quad (2)$$

Для множества измеряемых оптических характеристик минимизацию функционалов невязки можно проводить отдельно по функции распределения $S(r)$ и КПП $m = (n, \kappa)$. Рассмотрим некоторое решение $S_f = S_f(n, \kappa)$, восстановленное при минимизации по S функционала невязки (2) для одной из измеряемых оптических характеристик f в точке m . Решение S_f есть функция m . Определим другую характеристику

$$\tilde{g} = Q_g(n, \kappa)S_f \quad (3)$$

и построим функционал невязки вида

$$F_{gf}^2(m) = \|\tilde{g} - g\|^2 = \|Q_g(n, \kappa)S_f - g\|^2, \quad (4)$$

который определяет отклонение между измеренной характеристикой g и той же характеристикой $\tilde{g}$, рассчитанной по распределению S_f , восстановленному при обращении f . В этом случае задачу нахождения параметров n и κ можно рассматривать как задачу минимизации функционала $F_{gf}^2(n, \kappa)$ (4).

Обозначим через $m^* = (n^*, \kappa^*)$ точку, в которой функционал $F_{gf}^2(m)$ достигает минимума в априорно заданной области M . Совокупность параметров (n^*, κ^*) и функцию $S_f^*(n^*, \kappa^*)$, минимизирующую функционал $F_f^2(S, m)$ (2), будем рассматривать в качестве решения поставленной обратной задачи.

Зная функцию распределения $S(r)$, можно рассчитать объемную концентрацию $V_{\alpha\beta}$ и средний радиус частиц $\bar{r}_{\alpha\beta}$ на произвольном отрезке $\alpha \leq r \leq \beta$, принадлежащем области определения функции $S(r)$, по формулам [43]:

$$V_{\alpha\beta} = \frac{4}{3} \left(\alpha S(\alpha) - \beta S(\beta) + \int_{\alpha}^{\beta} S(r) dr \right), \quad (5)$$

$$\bar{r}_{\alpha\beta} = \frac{3}{4} V_{\alpha\beta} / [S(\alpha) - S(\beta)]. \quad (6)$$

Выбирая различные сочетания измеряемых характеристик $f = \{\mu_1(\theta, \lambda), \mu_2(\theta, \lambda), \varepsilon(\lambda)\}$, можно реализовать разные вычислительные схемы совместного восстановления микроструктуры, характеризуемой распределением $S(r)$, и КПП m .

3. Результаты численного моделирования

Рассмотрим результаты некоторых численных экспериментов, иллюстрирующие эффективность предлагаемой методики обращения. Для примера исследуем поведение функционала $F_{21}(n, \kappa)$, построенного на базе модельных поляризационных индикатрис рассеяния $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$. Модельные индикатрисы рассеяния получены в численном эксперименте для пяти углов рассеяния и четырех длин волн, соответствующих условиям оптических измерений в БАКе (разд. 1).

В качестве функции распределения частиц по размерам рассматривалась модель субмикронного аэрозоля типа «дымка H » [44] с комплексным показателем преломления $1,50 - i \cdot 0,005$, близким

к оценкам показателя преломления частиц пиролизного дыма [31–34].

На рис. 3, *а* изображена 3D-поверхность функционала относительной невязки $\tilde{F}_{21}(n, \kappa) = F_{21}(n, \kappa)/\|\mu_2\|$ для поляризационных индикатрис μ_1 и μ_2 в априорно выбранной области $M = \{1,35 \leq n \leq 1,60; 0 \leq \kappa \leq 0,02\}$, а на рис. 3, *б* — соответствующая карта изолиний в плоскости параметров (n, κ) в окрестности точного значения $(n_0 = 1,5; \kappa_0 = 0,005)$.

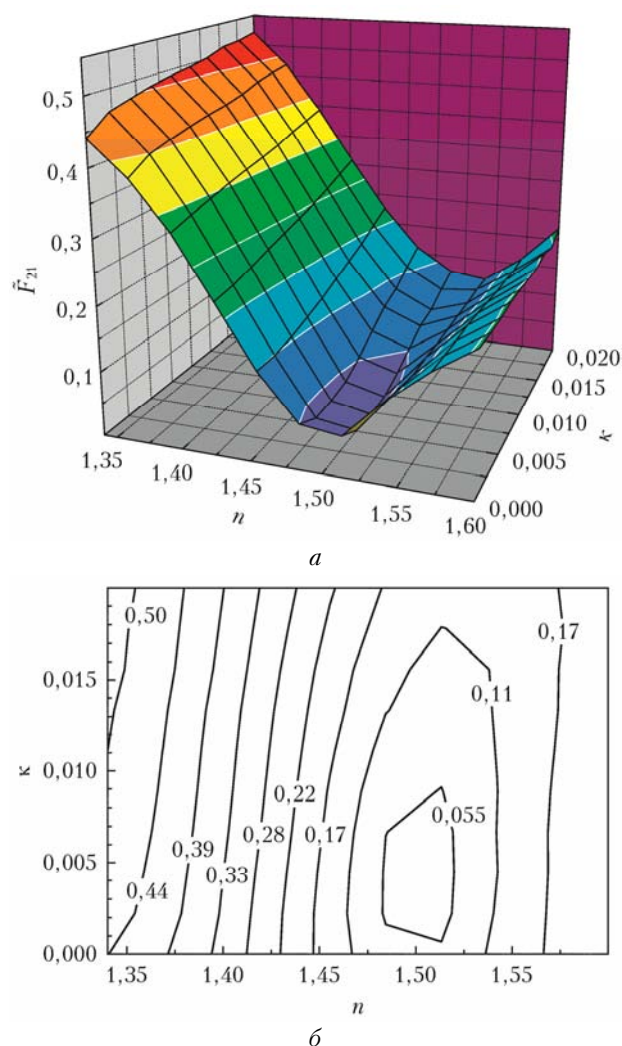


Рис. 3. Зависимость функционала невязки $\tilde{F}_{21}(n, \kappa) = F_{21}(n, \kappa)/\|\mu_2\|$ от КПП $m = n - i \cdot \kappa$ для модели субмикронного аэрозоля с показателем преломления $m_0 = 1,5 - i \cdot 0,005$ (*а*); карта изолиний $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$ в плоскости параметров (n, κ) (*б*) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Из рис. 3, *а* видно, что в рассматриваемой области изменения параметров (n, κ) поверхность функционала $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$ имеет форму оврага с крутыми склонами в направлении изменения параметра n , который преимущественно ориентирован в направлении изменения параметра κ . Функционал $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$ достигает минимума в точке (n_0, κ_0) ,

т.е. при точном значении комплексного показателя преломления.

Линии равного уровня на рис. 3, *б* определяют границы допустимой области P изменения параметров (n, κ) , в пределах которой обеспечивается заданная степень близости между модельными поляризационными индикатрисами и рассчитанными для значений $(n, \kappa) \in P$.

Из представленных данных, в частности, следует, что на уровне 5% допустимые значения (n, κ) не выходят за пределы области $\{1,48 < n < 1,52; 7 \cdot 10^{-4} < \kappa < 0,0085\}$ при среднеквадратичных отклонениях от точных значений $SD_n = 0,02; SD_\kappa = 0,004$. Повышение уровня до 10% расширяет область допустимых значений параметров (n, κ) с соответствующими оценками: $\{1,464 < n < 1,542; 0 \leq \kappa < 0,0178\}$, $SD_n = 0,039; SD_\kappa = 0,0097$.

Выбирая различные комбинации измеряемых характеристик $f = \{\mu_1(\theta, \lambda), \mu_2(\theta, \lambda), \epsilon(\lambda)\}$, можно построить функциональные поверхности $F_{gf}^2(n, \kappa)$ с другими свойствами.

Для сравнения на рис. 4 приведена зависимость от n функционала относительной невязки $\tilde{F}_{11}(n, \kappa) = F_{11}(n, \kappa)/\|\mu_1\|$, полученная при фиксированных значениях κ в той же априорной области M при обращении только одной характеристики $\mu_1(\theta, \lambda)$.

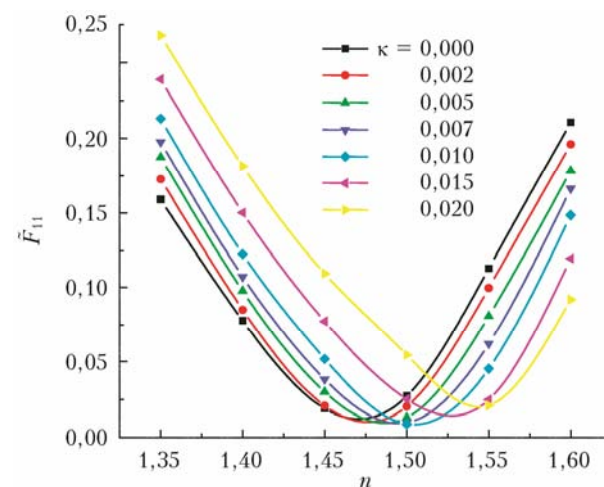


Рис. 4. Зависимость функционала невязки $\tilde{F}_{11}(n, \kappa)$ от n при различных значениях κ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Из сравнения изменчивости $\tilde{F}_{11}(n, \kappa)$ и $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$ можно отметить, что при удалении (n, κ) от точного значения (n_0, κ_0) функционал $\tilde{F}_{11}(n, \kappa)$ возрастает с меньшей скоростью и достигает меньшего размаха в области M . Другими словами, «склоны» поверхности $\tilde{F}_{11}(n, \kappa)$ менее крутые. Это приводит к увеличению области допустимых значений (n, κ) при заданном уровне функционала $\tilde{F}_{11}(n, \kappa)$. Например, на уровне 5% допустимые значения n заключены в интервале $1,419 < n < 1,577$ при среднеквадратичном отклонении от точного значения $SD_n = 0,079$.

Областью допустимых значений параметра κ является весь априорно выбранный интервал. В этом смысле рассматриваемый набор угловых и спектральных измерений индикатрисы $\mu_1(\theta, \lambda)$ является неинформативным относительно κ .

Наконец, рассмотрим функционал невязки $\tilde{F}_f(n, \kappa) = F_f(n, \kappa) / \|f\|$, где вектор f образован из измерений всех трех характеристик: $f = \{\mu_1(\theta, \lambda), \mu_2(\theta, \lambda), \epsilon(\lambda)\}$. Изменчивость функционала $\tilde{F}_f(n, \kappa)$ в априорной области M представлена на рис. 5.

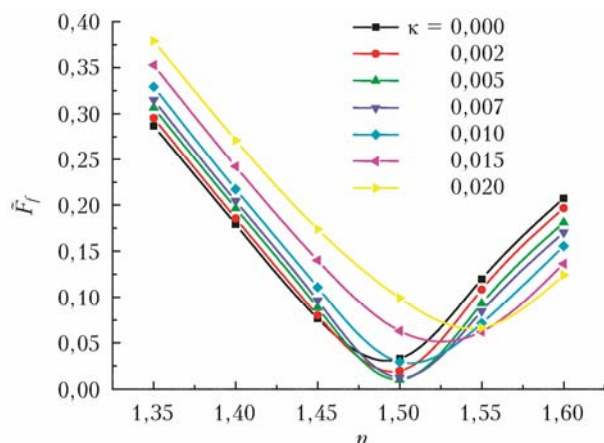


Рис. 5. Зависимость функционала невязки $\tilde{F}_f(n, \kappa)$ от n при различных значениях κ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Из рис. 5 видно, что положение глобального минимума $\tilde{F}_f(n, \kappa)$ совпадает с точным значением (n_0, κ_0) . По величине размаха функционал $\tilde{F}_f(n, \kappa)$ занимает промежуточное положение между $\tilde{F}_{11}(n, \kappa)$ и $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$. Допустимые значения (n, κ) на уровне 5% не выходят за пределы области $\{1,465 < n < 1,535; 0 \leq \kappa < 0,013\}$ при среднеквадратичных отклонениях от точных значений $SD_n = 0,035; SD_\kappa = 0,0067$.

Таким образом, из анализа представленных результатов следует, что совместные измерения $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$ наиболее эффективны для оценки комплексного показателя преломления $m = n - i \cdot \kappa$ на основе минимизации функционала невязки $F_{21}(n, \kappa)$.

4. Результаты обращения оптических измерений

С помощью разработанных алгоритмов выполнены исследования микрофизических параметров дымовых аэрозолей по данным оптических измерений, характеристика которых приведена в разд. 1.

На рис. 6, а приведен типичный пример поведения функционала относительной невязки $\tilde{F}_{21}(n, \kappa) = F_{21}(n, \kappa) / \|\mu_2\|$ в окрестности положения минимума по параметрам n и κ , полученный в результате обращения измерений двух поляризационных индикатрис рассеяния $\mu_1(\theta, \lambda)$, $\mu_2(\theta, \lambda)$, а на рис. 6, б — соответствующая карта изолиний в пространстве параметров (n, κ) .

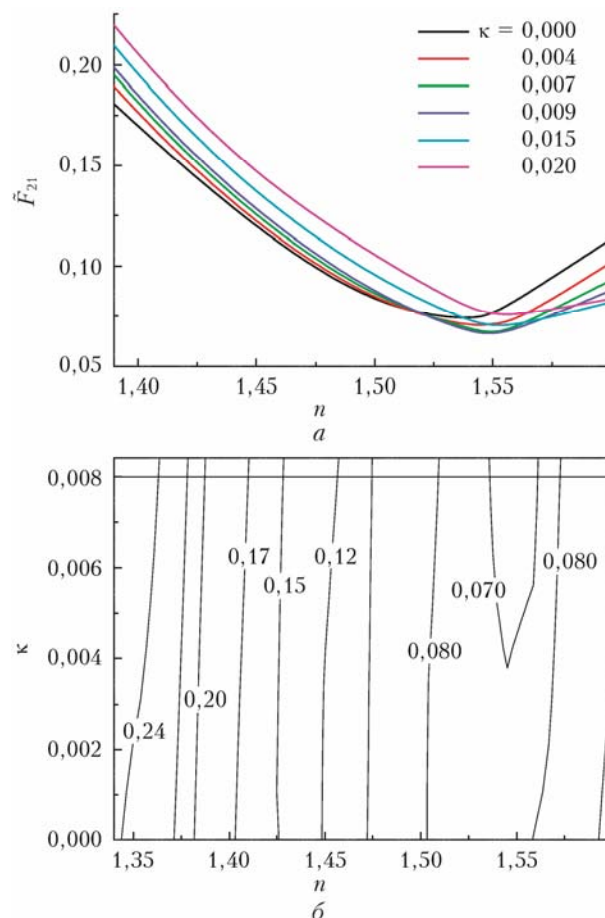


Рис. 6. Изменение функционала относительной невязки $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$ в зависимости от n для нескольких значений κ в окрестности минимума (а); карта изолиний функционала на плоскости (n, κ) (б) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Из представленных результатов видно, что минимум по n находится в окрестности значения 1,55. Чувствительность функционала невязки к мнимой части показателя преломления κ в рассматриваемой области низкая, поэтому оптическим измерениям в большей степени соответствуют значения в интервале $0,007 < \kappa < 0,009$. Для временного ряда измерений оптических характеристик пиролизного дыма оценки (n, κ) мало отличаются от вышеприведенных значений.

Рис. 7 дает представление о степени близости измеренных поляризационных индикатрис, для которых построен функционал $\tilde{F}_{21}(n, \kappa)$, и зависимостей $\mu_1(\theta, \lambda)$, $\mu_2(\theta, \lambda)$, восстановленных по результатам решения обратной задачи. Для подавляющего числа отдельных измерений расхождение не превышает 6–8%.

Обратимся к анализу результатов восстановления микроструктуры пиролизного дыма. На рис. 8 представлена динамика изменчивости $S(r)$ в субмикронном и грубодисперсном диапазонах, восстановленных при совместном обращении поляризаци-

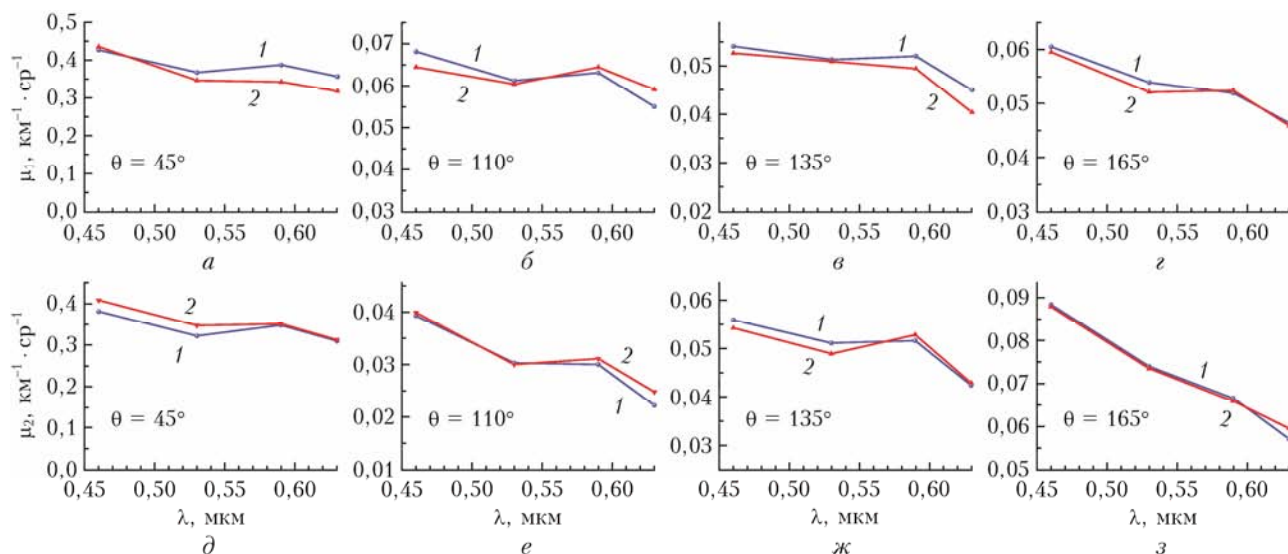


Рис. 7. Спектральные зависимости поляризационных индикатрис $\mu_1(\theta, \lambda)$ (а–г) и $\mu_2(\theta, \lambda)$ (д–з), измеренные (кривые 1) и восстановленные по результатам решения обратной задачи (кривые 2) для различных углов рассеяния (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

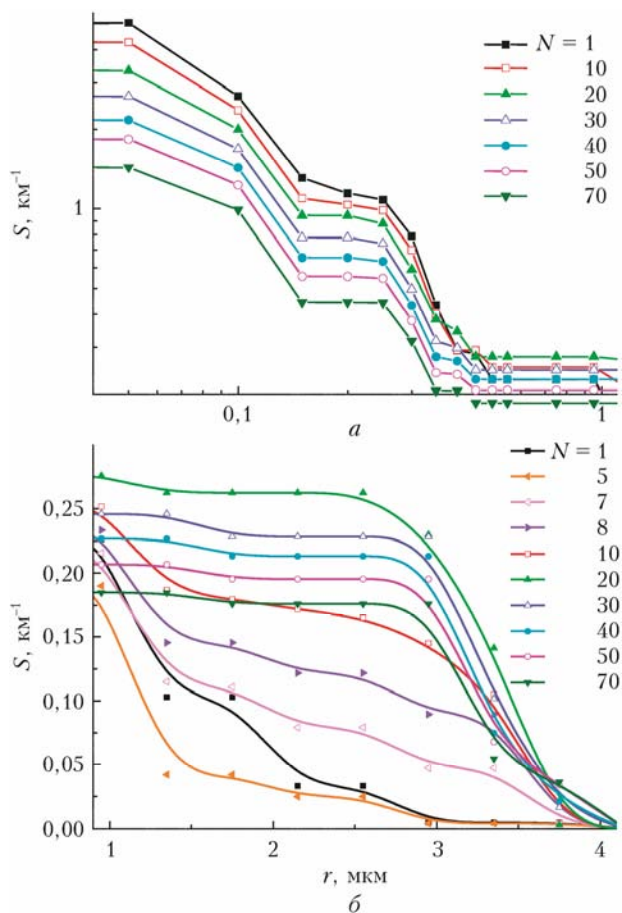


Рис. 8. Временная трансформация интегральных распределений $S(r)$ в субмикронном (а) и грубодисперсном (б) диапазонах по результатам обращения поляризационных индикатрис $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

онных индикатрис $\mu_1(\theta, \lambda)$ и $\mu_2(\theta, \lambda)$ для значений $n = 1,55$ и $\kappa = 0,007$. Таким, образом, результаты

трансформации $S(r)$, представленные на рис. 8, охватывают период около полутора суток.

Из рис. 8, а видно, что в период наблюдений суммарное сечение дымовых частиц $S = S(0)$ монотонно уменьшалось примерно в 3,5 раза. Уменьшение значений $S(r)$ также происходит при любых $r < 0,35$ мкм. Начиная с $r \approx 0,4$ мкм монотонность изменения $S(r)$ как функции времени нарушается.

Временную трансформацию $S(r)$ можно детально проследить на рис. 8, б только для грубодисперсной фракции. В течение около 2,5 ч от начала измерений ($N = 1 \div 5$) распределения $S(r)$ опускаются, что свидетельствует об уменьшении вклада грубодисперсных частиц в суммарное геометрическое сечение дымового аэрозоля. Затем в течение часа уровень $S(r)$ вновь повысился ($N = 7$) и превысил первоначальные значения.

Подъем распределений $S(r)$ продолжался в течение 10 ч от начала измерений ($N = 20$) в диапазоне r от 0,4 до 3,65 мкм. После 10 ч на протяжении более суток ($N = 20 \div 70$) вновь происходит понижение уровня распределений $S(r)$ с уменьшением вклада грубодисперсного аэрозоля. При последующем «старении» дыма ($N > 70$) происходит дальнейшее общее понижение кривых $S(r)$, не показанное на рис. 8.

С помощью восстановленных распределений $S(r)$ по формулам (5), (6) были рассчитаны интегральные параметры микроструктуры дымового аэрозоля. На рис. 9 представлены временные ряды объемных концентраций субмикронной $V^{(f)}$ и грубодисперсной $V^{(c)}$ фракций и суммарного ансамбля частиц $V^{(tot)}$ пиролизного дыма. Исходя из анализа данных о микроструктуре пиролизных дымов, полученных в лабораторных условиях [31, 32, 35], и с учетом диапазона размеров частиц в моделях аэрозольных дымок [44], условная граница между фракциями была выбрана равной 0,55 мкм.

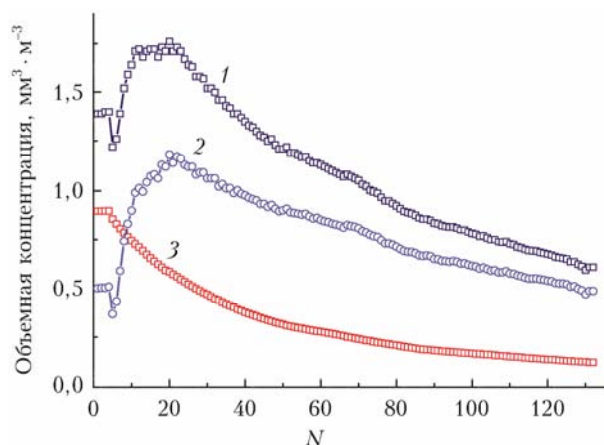


Рис. 9. Временные ряды объемных концентраций субмикронной (1), грубодисперсной (2) фракций и суммарного ансамбля частиц (3) пиролизного дыма по результатам совместного обращения поляризационных индикатрис (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Из рис. 9 видно, что на начальной стадии основной вклад в объемную концентрацию дыма вносит субмикронная фракция. «Полочка» на зависимости $V^{(f)}$ в начальный период адекватна состоянию поляризации на протяжении первых 90 мин (см. рис. 1), после чего ($N > 4$) начинается уменьшение концентрации субмикронных частиц. С этого же момента происходит сначала уменьшение, а затем рост объемной концентрации грубодисперсной фракции $V^{(c)}$, вклад которой через 4,5 ч ($N = 8-9$) достигает уровня $V^{(f)}$ и становится преобладающим. В отличие от $V^{(f)}$ зависимость $V^{(c)}$ имеет немонотонный характер с максимумом через 10 ч ($N = 20$) после начала эксперимента.

Для интерпретации представленных на рис. 9 зависимостей по данным восстановленных распределений $S(r)$ были определены счетные концентрации субмикронных $\Sigma^{(f)}$ и грубодисперсных $\Sigma^{(c)}$ частиц. В результате установлено, что наблюдаемое возрастание $V^{(c)}$ (кривая 2) сопровождалось уменьшением счетных концентраций $\Sigma^{(c)}$, $\Sigma^{(f)}$. В таких условиях изменение $V^{(c)}$ возможно только за счет увеличения размеров грубодисперсных частиц, что подтверждается далее на рис. 11, б.

Возможным механизмом укрупнения грубодисперсных частиц является «захват» ими субмикронных частиц в процессе коагуляции. Это подтверждается уменьшением $\Sigma^{(f)}$ и $V^{(f)}$. Также нельзя исключить возможную конденсацию паров газообразных продуктов пиролиза древесины на дымовых частицах.

После 10 ч ($N > 20$) стадия роста $V^{(c)}$ сменяется монотонным уменьшением объемной концентрации наряду с продолжающимся уменьшением счетной концентрации $\Sigma^{(c)}$. В указанный период средний размер грубодисперсных частиц меняется мало, поэтому наиболее вероятной причиной уменьшения $V^{(c)}$ остается осаждение частиц на стенках камеры.

Рис. 10 дает возможность сравнить результаты восстановления $V^{(f)}$ при обращении измерений раз-

личных оптических характеристик, полученных в локальном объеме (поляризационный спектрофелометр, кривая 1) и на трассе в БАКе (трассовый спектрофотометр, кривая 2). В целом оба метода дают согласующиеся между собой результаты, особенно при $N < 55$.

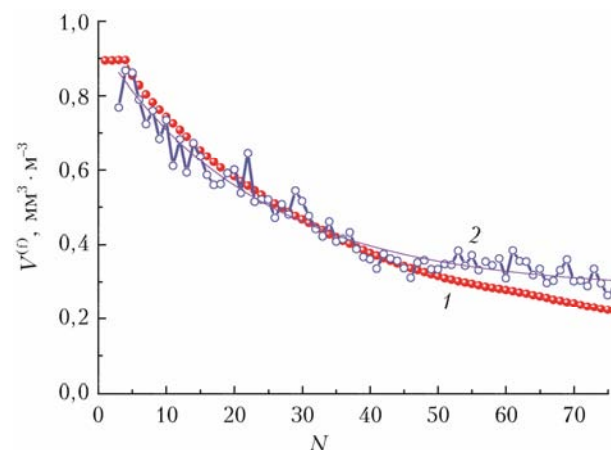


Рис. 10. Сравнение объемных концентраций субмикронных частиц, восстановленных из измерений поляризационных индикатрис (кривая 1) и коэффициентов ослабления (кривая 2) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Кривая 1 показывает монотонное экспоненциальное убывание $V^{(f)}$ в процессе «старения» дыма, что соответствует характеру изменения поляризационных индикатрис (см., например, рис. 1). Осцилляции, наблюдаемые на кривой 2, обусловлены значительными флуктуациями в спектральных измерениях $\epsilon(\lambda)$, особенно в ИК-диапазоне. Тем не менее кривая 2 вполне удовлетворительно аппроксимируется зависимостью экспоненциального вида. Еще в большей степени подвержены флуктуациям значения $V^{(c)}$, восстановленные из измерений $\epsilon(\lambda)$ (не приводятся).

На рис. 11 представлены временные ряды средних радиусов частиц субмикронной $\bar{r}_s^{(f)}$, грубодисперсной $\bar{r}_s^{(c)}$ фракций и суммарного ансамбля частиц $\bar{r}_s^{(tot)}$. На начальной стадии средние радиусы обеих фракций дыма минимальные.

В отличие от $V^{(f)}$, существенного изменения $\bar{r}_s^{(f)}$ по данным оптических измерений не выявлено. Из рис. 11, а видно, что значения $\bar{r}_s^{(f)}$ заключены в диапазоне 0,137–0,146 мкм. На начальном этапе $\bar{r}_s^{(f)}$ сохраняет постоянное минимальное значение и спустя 6 ч ($N = 12$) начинает монотонно увеличиваться. На увеличение $\bar{r}_s^{(f)}$, возможно, оказала влияние коагуляция субмикронных и грубодисперсных частиц. Константа коагуляции быстро увеличивается с ростом отношения радиусов коагулирующих частиц [44, 45]. Поэтому, как образно отмечено в [44], в полидисперсных аэрозолях мелкие частицы быстро «сдаются» крупными. Укрупнение субмикронных частиц до максимального значения продолжается около 12 ч. Через сутки после образования дыма ($N = 48$) величина $\bar{r}_s^{(f)}$ начинает монотонно убывать.

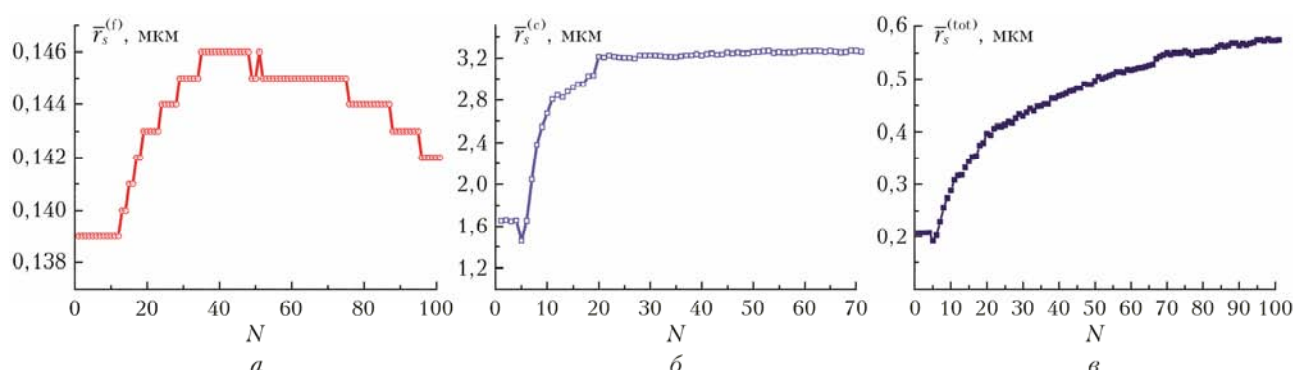


Рис. 11. Временные ряды средних радиусов частиц субмикронной (а), грубодисперсной (б) фракций и суммарного ансамбля частиц (в) пиролизного дыма по результатам совместного обращения поляризационных индикатрис (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

Значения среднего радиуса грубодисперсных частиц $\bar{r}_s^{(c)}$ на начальной стадии эксперимента близки к минимальным и варьируют в пределах 1,46–1,66 мкм. Увеличение $\bar{r}_s^{(c)}$ начинается одновременно с ростом $V^{(c)}$. Затем на протяжении около 8 ч ($N = 5–20$) происходит увеличение среднего радиуса грубодисперсных частиц почти вдвое (до 3,23 мкм) с последующей стабилизацией на достигнутом уровне.

В изменчивости $\bar{r}_s^{(tot)}$ проявляются характерные особенности микроструктурных свойств отдельных фракций. С задержкой около 2 ч с момента образования дыма одновременно с увеличением $\bar{r}_s^{(c)}$ начинается рост $\bar{r}_s^{(tot)}$ от минимального значения, равного 0,191 мкм, и продолжается в течение всего периода наблюдений. К концу эксперимента значение $\bar{r}_s^{(tot)}$ возрастает до 0,6 мкм, или примерно в три раза. Увеличение $\bar{r}_s^{(tot)}$ обусловлено в основном повышением относительного вклада грубодисперсных частиц в суммарное геометрическое сечение и объем (см. рис. 9), а также возрастанием $\bar{r}_s^{(c)}$.

Заключение

Рассмотрена динамика оптико-микрофизических характеристик пиролизного дыма, образованного в результате термического разложения древесины сосны. На протяжении около 65 ч проводились измерения ортогональных компонент коэффициента направленного светорассеяния для пяти углов рассеяния в интервале 15–165° на четырех длинах волн видимого диапазона спектра и трассовые измерения коэффициента ослабления света на 12 длинах волн в широком диапазоне 0,45–3,9 мкм.

Для определения микроструктуры и комплексного показателя преломления дымового аэрозоля разработан численный алгоритм совместного обращения измерений поляризационных индикатрис рассеяния и спектральных измерений коэффициента ослабления. В качестве анализируемых параметров микроструктуры были рассмотрены объемная кон-

центрация и средний радиус частиц с разделением на субмикронную и грубодисперсную фракции. С помощью разработанного алгоритма исследована временная изменчивость микрофизических параметров пиролизного дыма по данным оптических измерений.

Установлено, что вещественная часть показателя преломления находится в окрестности $n = 1,55$, мнимая часть заключена в интервале $0,007 < \kappa < 0,009$. На начальной стадии основной вклад в суммарную объемную концентрацию дыма вносит субмикронная фракция, содержание которой убывает по экспоненциальному закону в процессе старения дыма.

В отличие от субмикронной фракции, объемная концентрация грубодисперсной фракции $V^{(c)}$ изменяется немонотонно, возрастая в течение первых 10 ч, а затем убывая. Спустя 4,5 ч после начала эксперимента вклад $V^{(c)}$ в суммарный объем становится преобладающим.

Средний радиус субмикронных частиц $\bar{r}_s^{(f)}$ варьируется в узком интервале 0,137–0,146 мкм. Изменчивость среднего радиуса грубодисперсных частиц $\bar{r}_s^{(c)}$ более заметная. Ее характерные особенности – двукратное монотонное увеличение от 1,46 до 3,23 мкм в первые 15 ч без существенных вариаций впоследствии. Еще более значительно изменяется средний радиус суммарного ансамбля дымовых частиц $\bar{r}_s^{(tot)}$. В процессе старения дыма $\bar{r}_s^{(tot)}$ монотонно возрастает почти в три раза, от 0,19 до 0,6 мкм, преимущественно за счет относительного увеличения содержания грубодисперсного аэрозоля.

Разработанный подход будет использован при анализе результатов комплексных экспериментов в БАКе по исследованию свойств дымовых аэрозолей при вариациях условий их образования и трансформации, таких как температурный режим в камере горения, относительная влажность воздуха, состав и масса сжигаемых материалов и др. Большой круг решаемых задач связан с исследованием процессов, протекающих в условиях воздействия оптического излучения на дымы при их искусственном освещении.

Финансирование. Разработка алгоритма обращения оптических характеристик проведена в рамках госзадания ИОА СО РАН, а измерения и их интерпретация выполнены при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 19-77-20092).

Список литературы

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 279–292.
2. Карта пожаров. URL: <https://fires.ru> (дата обращения: 25.09.23).
3. National Interagency Fire Center (NIFC), Fire Information – Wildland Fire Statistics (2022). URL: <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires> (last access: 25.09.23).
4. Zhang Y.-H., Wooster M.J., Tutubalina O., Perry G.L.W. Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT // Remote Sens. Environ. 2003. V. 87, N 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00141-X.
5. Witte J.C., Douglass A.R., da Silva A., Torres O., Levy R., Duncan B.N. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 9287–9301. DOI: 10.5194/acp-11-9287-2011.
6. Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронцовская Н.Г., Головкин А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 3. Продукты лесных пожаров // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 740–749. DOI: 10.15372/AOO20170903.
7. Shi Y.R., Levy R.C., Eck T.F., Fisher B., Mattoo S., Remer L.A., Slutsker I., Zhang J. Characterizing the 2015 Indonesia fire event using modified MODIS aerosol retrievals // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 259–274. DOI: 10.5194/acp-19-259-2019.
8. Andreae M.O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 8523–8546. DOI: 10.5194/acp-19-8523-2019.
9. Fuzzi S., Baltensperger U., Carslaw K., Decesari S., Denier van der Gon H., Facchini M.C., Fowler D., Koren I., Langford B., Lohmann U., Nemitz E., Pandis S., Riipinen I., Rudich Y., Schaap M., Slowik J.G., Spracklen D., Vignati E., Wild M., Williams M., Gilaroni S. Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 8217–8299. DOI: 10.5194/acp-15-8217-2015.
10. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S.K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X.Y. Clouds and aerosols // 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: Cambridge University Press, 2014. P. 571–657. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
11. Zhang J., Reid J.S., Christensen M., Benedetti A. An evaluation of the impact of aerosol particles on weather forecasts from a biomass burning aerosol event over the midwestern United States: Observational-based analysis of surface temperature // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 6475–6494. DOI: 10.5194/acp-16-6475-2016.
12. Reid J.S., Koppmann R., Eck T.F., Eleuterio D.P. A review of biomass burning emissions part II: Intensive physical properties of biomass burning particles // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 799–825. DOI: 10.5194/acp-5-799-2005.
13. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kaercher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118. P. 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171.
14. Zannatta M., Gysel M., Bukowiecki N., Müller T., Weingartner E., Areskoug H., Fiebig M., Yttri K.E., Mihalopoulos N., Kouvarakis G., Beddows D., Harrison R.M., Cavalli F., Putaud J.P., Spindler G., Wiedensohler A., Alastuey A., Pandolfi M., Sellegri K., Świetlicki E., Jaffrezo J.L., Baltensperger U., Laj P. A European aerosol phenomenology-5: Climatology of black carbon optical properties at 9 regional background sites across Europe // Atmos. Environ. 2016. V. 145. P. 346–364. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.09.035.
15. Feng Y., Ramanathan V., Kotamarthi V.R. Brown carbon: A significant atmospheric absorber of solar radiation? // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 8607–8621. DOI: 10.5194/acp-13-8607-2013.
16. Bond T.C., Bergstrom R.W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review // Aerosol Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 27–67. DOI: 10.1080/02786820500421521.
17. Andreae M.O., Rosenfeld D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols // Earth-Science Rev. 2008. V. 89, N 1–2. P. 13–41. DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.03.001.
18. WHO: Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization, 2006. URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf.
19. WHO: Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia. World Health Organization, 2013. URL: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/>.
20. Reid J.S., Eck T.F., Christopher S.A., Koppmann R., Dubovik O., Eleuterio D.P., Holben B.N., Reid E.A., Zhang J. A review of biomass burning emissions part III: Intensive optical properties of biomass burning particles // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 827–849. DOI: 10.5194/acp-5-827-2005.
21. Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 557–568. DOI: 10.5194/amt-5-557-2012.
22. Горчакова И.А., Мохов И.И. Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 496–503.

23. Складнева Т.К., Белан Б.Д., Аришинов М.Ю. Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 215–222.
24. Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839; Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtidinov I.M., Pol'kin V.V., Terpigova S.A., Chernov D.G. Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 25–30. DOI: 10.1134/S1024856018010153.
25. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // Метеорол. и гидрол. 2016. № 2. С. 45–54.
26. Zhuravleva T.B., Kabanov D.M., Nasrtidinov I.M., Rus-skova T.V., Sakerin S.M., Smirnov A., Holben B.N. Radiative characteristics of aerosol during extreme fire event over Siberia in summer 2012 // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. P. 179–198. URL: <http://dx.doi.org/10.5194/amt-10-179-2017>.
27. Zhuravleva T.B., Nasrtidinov I.M., Kononov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M. Impact of the atmospheric photochemical evolution of the organic component of biomass burning aerosol on its radiative forcing efficiency: A box model analysis // Atmosphere. 2021. V. 12, N 12. P. 1555. DOI: 10.3390/atmos12121555.
28. Chand D., Schmid O., Gwaze P., Parmar R.S., Helas G., Zeromskiene K., Wiedensohler A., Massling A., Andreae M.O. Laboratory measurements of smoke optical properties from the burning of Indonesian peat and other types of biomass // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L12819. DOI: 10.1029/2005GL022678.
29. Andreae M.O., Gelencsér A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 3131–3148. DOI: 10.5194/acp-6-3131-2006.
30. Chen Y., Bond T.C. Light absorption by organic carbon from wood combustion // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 4. P. 1773–1787. DOI: 10.5194/acp-10-1773-2010.
31. Chakrabarty R.K., Moosmüller H., Chen L.-W.A., Lewis K., Arnott W.P., Mazzoleni C., Dubey M.K., Wold C.E., Hao W.M., Kreidenweis S.M. Brown carbon in tar balls from smoldering biomass combustion // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 13. P. 6363–6370. DOI: 10.5194/acp-10-6363-2010.
32. Chakrabarty R.K., Gyawali M., Yatavelli R.L.N., Pandey A., Watts A.C., Knue J., Chen L.-W.A., Pattison R.R., Tsibart A., Samburova V., Moosmüller H. Brown carbon aerosols from burning of boreal peatlands: Microphysical properties, emission factors, and implications for direct radiative forcing // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 5. P. 3033–3040. DOI: 10.5194/acp-16-3033-2016.
33. Sumlin B.J., Heinsohn Yu.W., Shetty N., Pandey A., Pattison R.S., Baker S., Hao W.M., Chakrabarty R.K. UV–Vis–IR spectral complex refractive indices and optical properties of brown carbon aerosol from biomass burning // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2018. V. 206. P. 392–398. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.12.009.
34. Sumlin B.J., Pandey A., Walker M.J., Pattison R.S., Williams B.J., Chakrabarty R.K. Atmospheric photo-oxidation diminishes light absorption by primary brown carbon aerosol from biomass burning // Environ. Sci. Tech. Lett. 2017. V. 4, N 12. P. 540–545.
35. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.В., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. Изменение микроструктуры древесных дымов в малогабаритной аэрозольной камере под воздействием различных факторов // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 4. С. 337–346.
36. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В. Некоторые особенности формирования дисперсной структуры дымовых аэрозолей при термическом разложении хвойной древесины. 1. Вариации массы сжигаемых образцов // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 3. С. 218–222.
37. Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П. Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 846–855; Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P. Variations in condensation properties of mixed smoke from biomass burning at different smoke evolution stages // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 9–18. DOI: 10.1134/S1024856018010086.
38. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В. Некоторые методические дополнения к решению обратной задачи для восстановления параметров дисперсной структуры дымов смешанного состава // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 183–189; Rakhimov R.F., Makienko E.V. Some methodic additions to the solution of the inverse problem for the reconstruction of the parameters of the disperse structure of mixed smokes // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 4. P. 259–265.
39. Ужegov В.Н., Ростов А.П., Пхалагов Ю.А. Автоматизированный трассовый фотометр // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 590–594.
40. Kozlov V.S., Kononov I.B., Uzhegov V.N., Chernov D.G., Pol'kin V.S., Zenkova P.N., Yausheva E.P., Shmargunov V.P., Dubtsov S.N. Dynamics of optical-microphysical characteristics of smokes from Siberian wildfires in the big aerosol chamber at the stages of smoke generation and ageing // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 1156046. DOI: 10.1117/12.2575499.
41. Щелканов Н.Н. Методы вычисления случайных погрешностей параметров окружающей среды из экспериментальных данных // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 815–821.
42. Веретенников В.В. Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 214–221; Veretennikov V.V. Simultaneous determination of aerosol microstructure and refractive index from sun photometry data // Atmos. Ocean. Opt. 2007. V. 20, N 3. P. 192–199.
43. Веретенников В.В., Меньщикова С.С., Ужegov В.Н. Изменчивость параметров микроструктуры приземного аэрозоля в летний сезон по результатам обращения измерений спектрального ослабления света на горизонтальной трассе в Томске. Часть I. Геометрическое сечение субмикронных и грубодисперсных частиц // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 857–866; Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S., Uzhegov V.N. Variability in parameters of the near-surface aerosol microstructure in summer according to results of inversion of measurements of spectral extinction of light on a horizontal path in Tomsk: Part I — Geometrical

- cross section of fine and coarse particles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 2. P. 128–137. DOI: 10.1134/S1024856019020155.
44. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
45. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.
46. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2016. 1149 p.

V.V. Veretennikov, V.N. Uzhegov, V.P. Shmargunov. Dynamics of microphysical parameters of the pyrolysis smoke based on the results of inversion of aerosol scattering and extinction coefficients in the Big Aerosol Chamber of IAO SB RAS.

Measurements of polarization scattering phase functions and spectral extinction coefficients were carried out in smoke aerosols formed as a result of thermal decomposition of pine wood in the mode of low-temperature pyrolysis in the Big Aerosol Chamber (BAC) of IAO SB RAS. Using the developed algorithm for inverting optical measurements, the microstructure and complex refractive index of pyrolysis smoke are retrieved. The volume concentration and the mean radius of particles are analyzed microstructure parameters, with division into fine and coarse fractions. The temporal variability of the microphysical parameters of smoke aerosol is studied for 65 hours. It has been established that the real part of the refractive index is in the vicinity of $n = 1.55$, and the imaginary part is in the range $0.007 < \kappa < 0.009$. The mean radius of fine particles varies in the narrow range $0.137\text{--}0.146\text{ }\mu\text{m}$. During smoke aging, the mean particle radius of the total ensemble monotonically increased from 0.19 to $0.6\text{ }\mu\text{m}$, mainly due to a relative increase in the content of coarse aerosol. Results of this work are important for estimation of the radiative forcing of aerosol, improvement of climate models and algorithms of remote optical sounding.