

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

**Оптические и микрофизические свойства  
смешанного дыма по данным поляризационных  
спектронефелометрических измерений**

**Р.Ф. Рахимов, В.С. Козлов, А.Г. Тумаков, В.П. Шмаргунов\***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.05.2013 г.

С помощью поляризационного спектронефелометра в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН (1800 м<sup>3</sup>) проведены измерения спектральных коэффициентов углового аэрозольного рассеяния в смешанных дымах в ходе их 3-суточной эволюции. Дымы формировались при смешении продуктов термического разложения хвойных древесных материалов от источников низкотемпературного пиролиза (~400 °С) и высокотемпературного открытого горения с пламенем (~800 °С). По данным решения обратной задачи исследованы особенности формирования дисперсного состава дымов и комплексного показателя преломления частиц для трех интервалов дисперсности.

Показано, что динамика формирования и эволюции смешанных дымов кардинальным образом определяется вкладом в оптические свойства сильнопоглощающей микродисперсной фракции частиц (радиусы <150 нм, близкий к саже показатель поглощения вещества частиц ~0,4–0,8). Частицы средне- и крупнодисперсных размеров (более 200 нм) являются умеренно- и слабопоглощающими: показатель поглощения ~0,03±0,15. Поглощательная способность смешанного дыма высока, и альbedo однократного рассеяния достигает низких значений ~0,60±0,45, уменьшаясь при выстаивании дыма. При дымообразовании формируются двухмодальные распределения частиц по размерам со средне- (350–400 нм) и крупнодисперсной ~760 нм модами. При длительном выстаивании спектр размеров характеризуется одной модой дыма ~600 нм, а эффективный радиус частиц возрастает от 160 до 330 нм. Показано, что взаимная динамика объемных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления, альbedo однократного рассеяния и эффективного радиуса частиц описывается статистически значимыми линейными корреляционными связями.

*Ключевые слова:* смешанный дым, поляризационная спектронефелометрия, обратная задача, распределение частиц по размерам, комплексный показатель преломления, сажа; mixed smoke, polarization spectronephelometry, inverse problem, particle's size distribution, complex index of refraction, soot.

### Введение

Крупномасштабные возгорания лесов и торфяников являются важным источником пополнения атмосферы углеродсодержащими аэрозолями и парниковыми газами, в значительной степени определяющими радиационный баланс в атмосфере и климатические изменения [1–9]. Состав дымов лесных пожаров представляет собой сложный набор компонентов, включающих капельки масел, сажевые агрегаты, смешанные масляно-сажевые частицы, выветренные осколки легких летающих частиц золы и фонового аэрозоля [1–4]. В процессах горения лесных горючих материалов (ЛГМ) выявлена эффективная генерация поглощающей компоненты атмосферного аэрозоля — сажи, аморфных образований из углеводородных радикалов [9–15]. Высокая счетная концентрация частиц, формирующих саже-

вую компоненту дымов, предопределяет их высокую активность не только внутри дисперсной смеси, формируя диэлектрическую неоднородность состава дымовых фракций, но и во взаимодействии с другими радиационно-значимыми компонентами атмосферы. Неоднозначные вариации значений комплексного показателя преломления (КПП) дымовых частиц по спектру размеров [11–15] значительно затрудняют оценки оптических характеристик, в том числе такого важного климатообразующего фактора, как альbedo однократного аэрозольного рассеяния в видимой области спектра.

В настоящей статье рассмотрены результаты дымового эксперимента, реализованного в Большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН объемом 1800 м<sup>3</sup>.

### Методика исследований и анализ результатов измерений

Для формирования смешанного древесного дыма внутри БАК использованы две муфельные печи. В одной древесные материалы массой  $M \sim 200$  г

\* Рустам Фуатович Рахимов (temur@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Александр Георгиевич Тумаков (ag@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

сжигались с открытым пламенем при высокой температуре  $T \sim 800$  °С, и одновременно во второй печи производилось термическое разложение образцов  $M \sim 400$  г в режиме низкотемпературного пиролиза  $T \sim 400$  °С. Доступ воздуха в зону прогрева второй печи был ограничен закрытой дверцей муфельной печи.

На всех стадиях образования и эволюции смешанного за время  $t$  дыма производились измерения спектральных коэффициентов направленного аэрозольного рассеяния  $\beta_s(t, \lambda_i, \theta_j)$  для четырех длин волн  $\lambda = 455, 525, 585, 630$  нм, пяти углов рассеяния  $\theta = 15, 45, 110, 135, 165^\circ$  и двух ортогональных состояний поляризации рассеянного света, выполняемые с помощью поляризационного спектро-нефелометра APSN-02, созданного в ИОА СО РАН [16]. Измерительный прибор новой конструкции позволял изучать временную динамику 40 оптических характеристик (элементов вектора измерения) дымового аэрозоля.

В нефелометре достигнута высокая чувствительность регистрации оптических сигналов, что позволило измерять значения  $\beta_s$  на длине волны 525 нм под углом рассеяния  $45^\circ$  с точностью  $1,5 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  при отношении сигнал-шум  $\sim 10/1$ . Это сделало возможным не только исследовать динамику формирования и выстаивания дыма в течение 3 сут непрерывных измерений, но и рассматривать стадии очистки (вентиляции) БАК от дымовых остатков, оценивать свойства аэрозоля в атмосферном воздухе, используемом для очистки БАК.

Во временной изменчивости спектральных коэффициентов направленного рассеяния (рис. 1) отчетливо прослеживается первый этап ( $t \sim 1\text{--}2$  ч), когда БАК заполнялась продуктами термического разложения древесных материалов. На втором этапе эксперимента ( $t \sim 2\text{--}10$  ч) наблюдается наиболее сильная динамика оптических сигналов свежего дыма: значения коэффициентов снижаются примерно на порядок. Третий этап эксперимента ( $t \sim 10\text{--}64$  ч) — этап «медленной» эволюции старого дыма, характеризующийся сравнительно невысоким градиентом уменьшения сигналов: тенденция экспоненциального убывания примерно на порядок

за 2 сут. При этом наклон каждой кривой  $\beta_s(t, \lambda_i, \theta_j)$  изменяется сравнительно слабо.

При выстаивании дыма до  $t = 64$  ч в составе дымовой среды значительно варьируют во времени и по шкале размеров как распределения сечения и объема частиц по размерам, так и значения их комплексного показателя преломления (см. ниже таблицу).

Следующий период измерений ( $t \sim 65\text{--}84$  ч) иллюстрирует изменчивость оптических сигналов при вентиляции, т.е. при очистке камеры сначала посредством «выброса» дыма из БАК в атмосферу с помощью вытяжной вентиляции ( $t \sim 65\text{--}71$  ч), а затем «наддува» камеры наружным атмосферным воздухом с помощью приточной вентиляции ( $t \sim 72\text{--}84$  ч). Из рис. 1 видно, что такая очистка камеры в течение суток приводит к уменьшению уровня оптических сигналов для  $\theta = 45^\circ$  почти на 2 порядка, т.е. примерно до  $30 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ . Следует считать, что дальнейшее продолжение наддува камеры наружным воздухом (до  $t \sim 136$  ч) в основном отслеживает динамику состава атмосферного аэрозоля.

Данные спектронефелометрических измерений, используемые в качестве исходной информации для решения обратной задачи, позволяют оценить спектр размеров и КПП дымовых частиц [11–15, 17]. Однако при исследовании свойств смешанных дымов, представленных суперпозицией сильнопоглощающих сажевых частиц и слабопоглощающей аэрозольной компоненты, для успешного решения обратной задачи не удастся обойтись лишь одним (осредненным по всему спектру размеров) значением КПП, как это обычно практикуется при исследованиях атмосферного аэрозоля [17].

В составе дымов лесных пожаров смешаны продукты высокотемпературного пламенного горения с высоким содержанием поглощающих частиц (фронты пожаров) и умеренно поглощающие частицы низкотемпературного пиролиза (зоны тления ЛГМ) [1, 3, 4, 13]. Вследствие высокой счетной концентрации частиц микродисперсной поглощающей фракции важную роль в динамике дымов на стадии их образования играет коагуляция частиц.

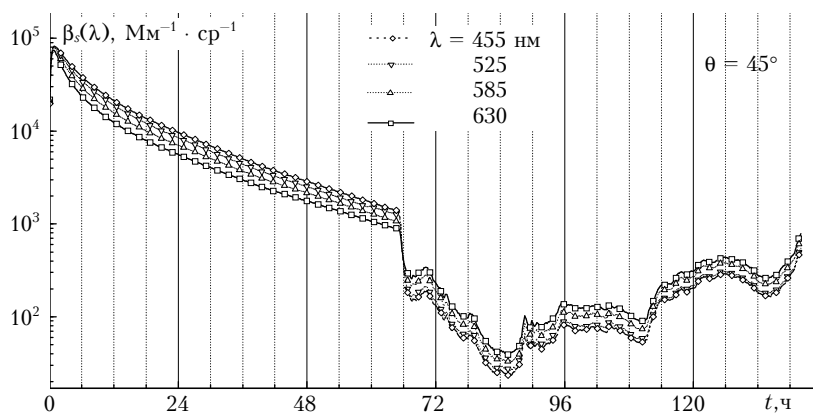


Рис. 1. Временная динамика перпендикулярно поляризованной компоненты коэффициента направленного аэрозольного рассеяния  $\beta_s(\lambda_i, \theta = 45^\circ)$  в смешанном дыме для четырех длин волн

В результате формируется разнородная смесь дымовых частиц с изменяющимися по спектру размеров значениями действительной и мнимой частей КПП.

Выполненные ранее исследования [11–15] показали, что для успешного обращения нефелометрических данных (снижения невязки решения) в смешанных дымах необходимо предварительно определять эффективные значения  $m = n - i\kappa$ , осредненные, как минимум, по трем интервалам шкалы дисперсности. Применяемая методика предварительной оценки эффективных значений КПП по интервалам дисперсности предполагает итерационную схему поиска минимума невязки между измеренными и восстановленными значениями оптических характеристик. Некоторые особенности такой методики подробно обсуждались в предыдущих работах [11, 14, 15]. Расчетная схема оценки КПП такова, что нередко возникает необходимость в нескольких уточняющих итерациях с повторным возвратом к оценкам КПП на смежных интервалах дисперсности.

В результате решения обратной задачи удается получить подробную информацию о временной изменчивости оптико-микрофизических характеристик смешанных дымов (см. таблицу). Построчно данные характеризуют временную изменчивость оцениваемых характеристик (время указано во 2-й колонке). Первая колонка соответствует условному номеру выбранной для обращения временной реализации (точки измерения). В 3–5-й колонках приведены для трех интервалов дисперсности значения КПП частиц  $m = n - i\kappa$  (где  $n$  – действительная, а  $\kappa$  – мнимая части) и указаны границы интервалов дисперсности. В 6–8-й колонках даны значения интегральных характеристик:  $N$  – полной счетной концентрации дымовых частиц, суммарного сечения  $S$  и объема  $V$ . В 9-й колонке приведен оцениваемый по  $V$  и  $S$  эффективный радиус частиц  $r_{\text{эф}}$ . В 10-й и 11-й колонках указаны рассчитанные по теории Ми объемный коэффициент ослабления  $\beta_e(t)$  и объемный коэффициент обратного рассеяния  $\beta_r(t)$ . В 12-й колонке даны рассчитанные по значениям объемных коэффициентов рассеяния и ослабления значения альbedo однократного рассеяния  $\omega(t)$  на длине волны 525 нм.

На рис. 2 представлены распределения сечения и объема и объема дымовых частиц по размерам, восстановленные по результатам нефелометрических измерений на начальном этапе формирования смешанного дыма (до  $t \sim 2$  ч), а в таблице – соответствующие им значения КПП по интервалам дисперсности. Нетрудно видеть, что на начальном этапе выстывания смешанного дыма происходит устойчивое уменьшение ( $\sim$  в 5 раз) содержания микродисперсной фракции (радиусом  $r \sim 30$ – $200$  нм). Динамика спектра размеров частиц приводит к формированию среднедисперсной фракции ( $r \sim 300$ – $600$  нм) с распределением по размерам, близким к одномодальному, радиусом около 400 нм (рис. 2, б). При этом происходит рост верхней границы размеров до  $r \sim 700$  нм. Таким образом, для выбранных углов рассеяния и диапазона длин волн  $\lambda = 455$ – $630$  нм

оптический образ смешанных дымов формируется в основном частицами радиусом до 700 нм.

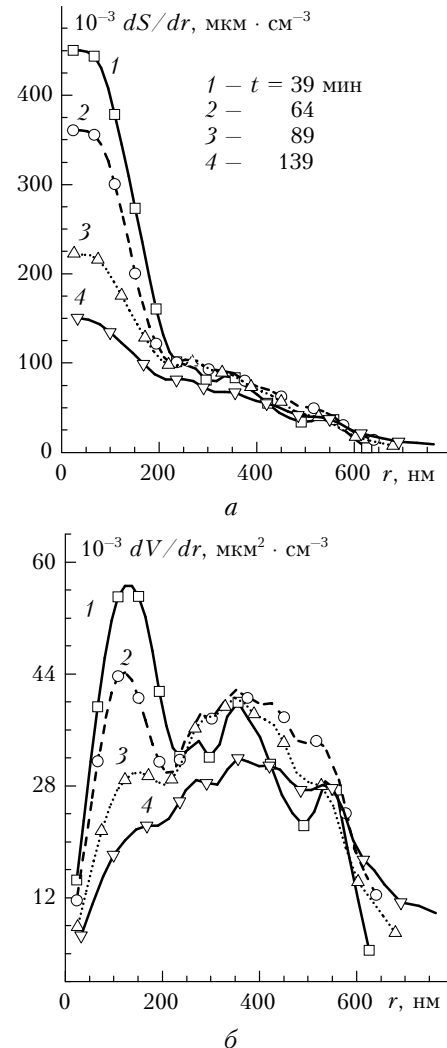


Рис. 2. Распределения суммарного сечения и объема частиц по размерам для смешанных дымов на 2-часовой начальной стадии выстывания «свежего» дыма в БАК

Динамика распределений по размерам геометрического сечения  $dS/dr$  и объема  $dV/dr$  частиц при длительной эволюции дыма в БАК (рис. 3) по ряду признаков согласуется с особенностями динамики начальной стадии дымообразования (см. рис. 2). На рис. 3, б прослеживаются процессы интенсивного стока частиц всех размеров и накопления основной массы дымовых частиц в интервале среднедисперсной фракции  $r \sim 300$ – $600$  нм. Наряду с этим проявляются и различия в трансформации «свежего» (до  $t \sim 2$  ч, см. рис. 2, б) и «старого» дыма. Так, в результате интенсивной динамики дымов от 10 до 40 ч сформировались бимодальные распределения объема дымовых частиц по размерам с модами среднедисперсных (300–400 нм) и крупнодисперсных ( $\sim 750$  нм) частиц (рис. 3, б). При этом верхняя граница спектра размеров  $r$  достигла  $\sim 1000$  нм (кривая 1). Однако в результате более чем 2-суточной эволюции дыма в БАК его спектр размеров

уже характеризуется лишь одной среднедисперсной модой выстоявшегося дыма  $r \sim 600$  нм (кривая 4).

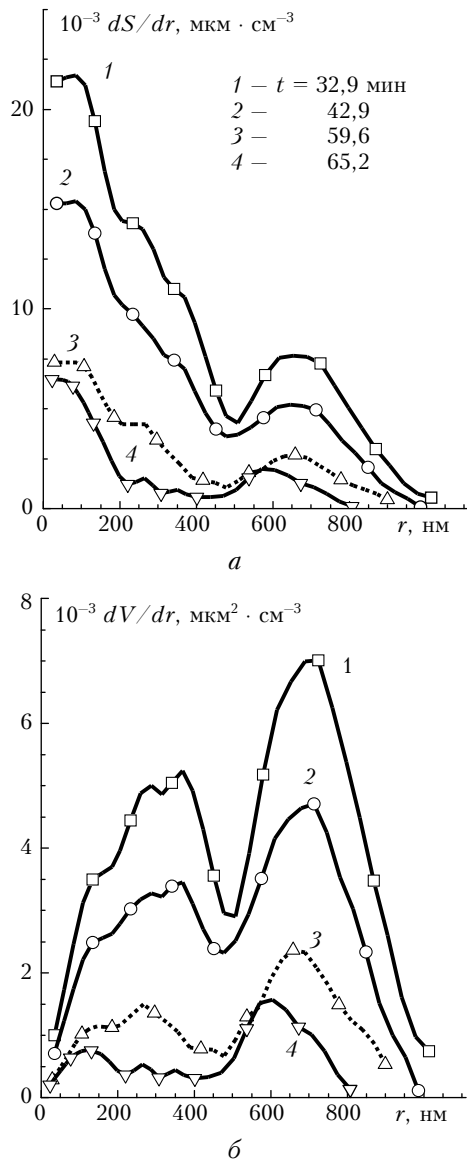


Рис. 3. Распределения по размерам сечения  $dS/dr$  (а) и объема  $dV/dr$  (б) частиц на различных стадиях длительной эволюции «старого» смешанного дыма в БАК

При старении смешанного дыма происходит сильное уменьшение значений интегральных концентраций  $N$ ,  $S$ ,  $V$  (см. таблицу). Так, суммарный объем дымовых частиц в течение 64 ч уменьшается более чем на порядок. Однако при этом наблюдается рост эффективного радиуса дымовых частиц  $r_{эф}$  от  $\sim 160$  нм для свежего дыма до  $\sim 320$  нм для выстоявшегося дыма, что является характерной особенностью динамики смешанных дымов, противоположной изменчивости этого параметра для пиролизных дымов [18]. Наиболее вероятное объяснение этого факта — преобладающая роль интенсивного коагуляционного укрупнения дымовых частиц в смешанных дымах по сравнению с седиментационным стоком средне- и крупнодисперсных частиц.

Рис. 4 иллюстрирует эффективность очистки аэрозольной камеры от остатков смешанного дыма при ее вентиляции в течение 20 ч. Наиболее эффективно удаляются частицы  $r > 250$  нм, уровень содержания дымовых частиц снижается в 3–5 раз, а значения коэффициента ослабления  $\beta_e$  — примерно до  $45,5 \text{ Мм}^{-1}$ .

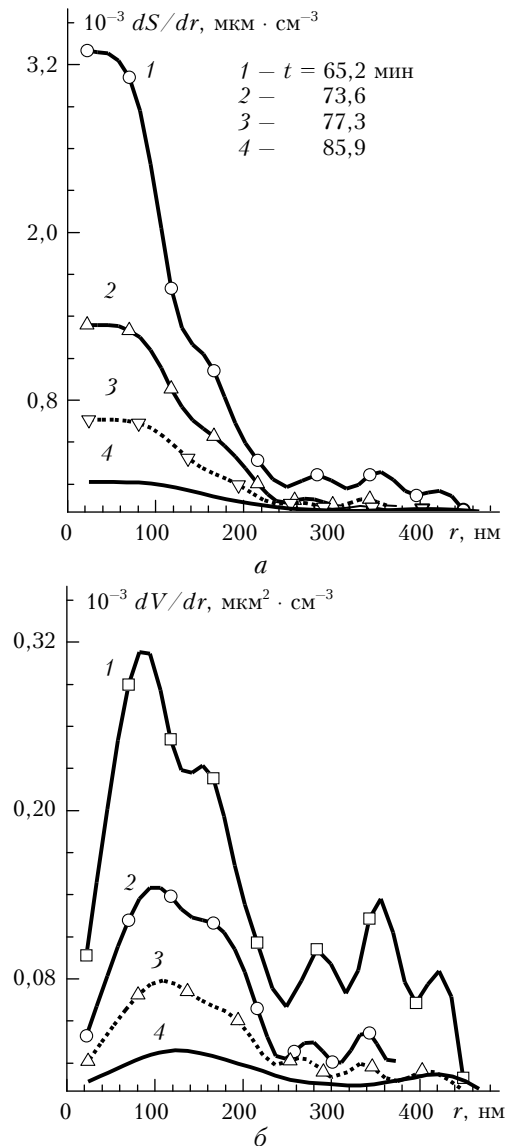


Рис. 4. Временная динамика распределения по размерам сечения (а) и объема (б) частиц аэрозоля в БАК, иллюстрирующая эффективность «очистки» камеры от дыма посредством прокачки атмосферным воздухом в течение 20 ч

На рис. 5 представлена временная динамика значений КПП для трех фракций дыма в ходе его 3-суточной эволюции в БАК. Отметим, что пределы вариаций показателя поглощения частиц очень велики и составляют в среднем 40 раз — от 0,02 до 0,8. На начальной стадии формирования смешанного дыма ( $t < 2$  ч) мнимая часть КПП микродисперсной фракции ( $r \sim 30\text{--}150$  нм) достигает высоких значений  $\alpha_1 \sim 0,47$ . Однако для среднедисперсных ( $r \sim 160\text{--}300$  нм) и крупнодисперсных

Таблица пофракционного изменения комплексного показателя преломления и других параметров смешанного дыма во времени (14.02.2012)

№ точки	$t$ , ч	I интервал, нм (микро-)		II интервал, нм (средне-)		III интервал, нм (крупно-)		$N \cdot 10^{-4}$ , $\text{см}^{-3}$	$S \cdot 10^{-3}$ , $\text{МКМ}^2 \cdot \text{см}^{-3}$	$V \cdot 10^{-2}$ , $\text{МКМ}^3 \cdot \text{см}^{-3}$	$r_{\text{эф}}$ , нм	$\beta_e \cdot 10^{-3}$ , $\text{ММ}^{-1}$	$\beta_{\pi} \cdot 10^{-3}$ , $\text{ММ}^{-1}$	$\omega$
1	2	3		4		5		6	7	8	9	10	11	12
4	0,6	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,72$	$r_{\text{к}} = 160$ $\alpha = 400\text{e-}3$	$r_{\text{н}} = 160$ $n = 1,61$	$r_{\text{к}} = 300$ $\alpha = 460\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 300$ $n = 1,66$	$r_{\text{к}} = 648$ $\alpha = 550\text{e-}4$	643	379	203	161	174	33,0	0,605
6	1,1	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,76$	$r_{\text{к}} = 150$ $\alpha = 470\text{e-}3$	$r_{\text{н}} = 150$ $n = 1,61$	$r_{\text{к}} = 305$ $\alpha = 690\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 305$ $n = 1,67$	$r_{\text{к}} = 650$ $\alpha = 540\text{e-}4$	544	351	201	172	176	32,6	0,608
8	1,5	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,62$	$r_{\text{к}} = 150$ $\alpha = 380\text{e-}3$	$r_{\text{н}} = 150$ $n = 1,66$	$r_{\text{к}} = 308$ $\alpha = 800\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 308$ $n = 1,66$	$r_{\text{к}} = 662$ $\alpha = 610\text{e-}4$	609	379	222	176	176	30,5	0,588
12	2,3	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 139$ $\alpha = 420\text{e-}3$	$r_{\text{н}} = 139$ $n = 1,65$	$r_{\text{к}} = 307$ $\alpha = 990\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 307$ $n = 1,66$	$r_{\text{к}} = 660$ $\alpha = 660\text{e-}4$	518	335	208	186	161	25,9	0,576
16	3,1	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 224$ $\alpha = 0,713$	$r_{\text{н}} = 224$ $n = 1,65$	$r_{\text{к}} = 443$ $\alpha = 915\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 443$ $n = 1,66$	$r_{\text{к}} = 1062$ $\alpha = 250\text{e-}4$	292	256	180	212	144	20,8	0,546
24	4,6	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 227$ $\alpha = 0,789$	$r_{\text{н}} = 227$ $n = 1,67$	$r_{\text{к}} = 460$ $\alpha = 119\text{e-}3$	$r_{\text{н}} = 460$ $n = 1,64$	$r_{\text{к}} = 1092$ $\alpha = 257\text{e-}4$	144	200	163	245	120	15,3	0,528
36	7,3	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,57$	$r_{\text{к}} = 228$ $\alpha = 0,786$	$r_{\text{н}} = 228$ $n = 1,67$	$r_{\text{к}} = 443$ $\alpha = 0,128$	$r_{\text{н}} = 443$ $n = 1,63$	$r_{\text{к}} = 1122$ $\alpha = 0,039$	99,2	158	143	270	105	15,7	0,514
48	10,4	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,64$	$r_{\text{к}} = 229$ $\alpha = 0,716$	$r_{\text{н}} = 229$ $n = 1,69$	$r_{\text{к}} = 435$ $\alpha = 0,148$	$r_{\text{н}} = 435$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 1100$ $\alpha = 0,063$	69,5	130	128	296	77,4	9,07	0,499
88	17,9	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,64$	$r_{\text{к}} = 235$ $\alpha = 0,690$	$r_{\text{н}} = 235$ $n = 1,70$	$r_{\text{к}} = 436$ $\alpha = 0,160$	$r_{\text{н}} = 436$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 1100$ $\alpha = 0,080$	42,4	81,6	86,1	317	47,7	4,06	0,481
124	25,4	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,64$	$r_{\text{к}} = 235$ $\alpha = 0,653$	$r_{\text{н}} = 235$ $n = 1,71$	$r_{\text{к}} = 426$ $\alpha = 0,172$	$r_{\text{н}} = 426$ $n = 1,58$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 0,089$	29,2	52,2	58,3	317	32,0	2,73	0,475
160	32,9	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,66$	$r_{\text{к}} = 233$ $\alpha = 0,654$	$r_{\text{н}} = 233$ $n = 1,71$	$r_{\text{к}} = 426$ $\alpha = 0,172$	$r_{\text{н}} = 426$ $n = 1,57$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 939\text{e-}4$	20,1	37,9	40,9	324	21,8	1,78	0,472
196	40,4	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,65$	$r_{\text{к}} = 233$ $\alpha = 0,662$	$r_{\text{н}} = 233$ $n = 1,71$	$r_{\text{к}} = 426$ $\alpha = 0,169$	$r_{\text{н}} = 426$ $n = 1,57$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 102\text{e-}3$	14,9	25,8	26,9	312	14,8	1,12	0,467
232	47,9	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,67$	$r_{\text{к}} = 233$ $\alpha = 0,650$	$r_{\text{н}} = 233$ $n = 1,70$	$r_{\text{к}} = 426$ $\alpha = 0,170$	$r_{\text{н}} = 426$ $n = 1,56$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 100\text{e-}3$	10,2	18,3	14,3	311	10,4	0,774	0,467
262	54,2	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,70$	$r_{\text{к}} = 239$ $\alpha = 0,617$	$r_{\text{н}} = 239$ $n = 1,68$	$r_{\text{к}} = 440$ $\alpha = 0,149$	$r_{\text{н}} = 440$ $n = 1,58$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 0,106$	10,8	14,3	14,6	305	8,01	0,614	0,471
288	59,6	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,70$	$r_{\text{к}} = 239$ $\alpha = 0,593$	$r_{\text{н}} = 239$ $n = 1,67$	$r_{\text{к}} = 440$ $\alpha = 0,143$	$r_{\text{н}} = 440$ $n = 1,58$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 0,113$	8,45	11,1	11,1	299	6,19	0,465	0,472
312	64,6	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,72$	$r_{\text{к}} = 239$ $\alpha = 0,565$	$r_{\text{н}} = 239$ $n = 1,68$	$r_{\text{к}} = 440$ $\alpha = 0,128$	$r_{\text{н}} = 440$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 890$ $\alpha = 0,113$	6,96	8,92	8,89	299	4,92	0,386	0,476
315	65,2	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,67$	$r_{\text{к}} = 202$ $\alpha = 0,336$	$r_{\text{н}} = 202$ $n = 1,68$	$r_{\text{к}} = 420$ $\alpha = 0,107$	$r_{\text{н}} = 420$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 842$ $\alpha = 0,120$	9,21	6,39	5,39	253	2,93	0,244	0,495
320	66,3	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,61$	$r_{\text{к}} = 142$ $\alpha = 509\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 142$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 222$ $\alpha = 517\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 222$ $n = 1,56$	$r_{\text{к}} = 498$ $\alpha = 553\text{e-}4$	4,96	1,80	0,626	104	0,415	0,0649	0,771
327	67,7	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 143$ $\alpha = 180\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 143$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 227$ $\alpha = 240\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 227$ $n = 1,55$	$r_{\text{к}} = 390$ $\alpha = 420\text{e-}4$	4,25	1,49	0,460	92,8	0,270	0,0556	0,873
337	69,8	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 153$ $\alpha = 750\text{e-}5$	$r_{\text{н}} = 153$ $n = 1,57$	$r_{\text{к}} = 221$ $\alpha = 200\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 221$ $n = 1,55$	$r_{\text{к}} = 376$ $\alpha = 230\text{e-}4$	3,86	1,47	0,483	98,8	0,298	0,0622	0,925
355	73,6	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 155$ $\alpha = 270\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 155$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 211$ $\alpha = 290\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 211$ $n = 1,58$	$r_{\text{к}} = 376$ $\alpha = 290\text{e-}4$	2,10	0,799	0,263	98,7	0,171	0,0337	0,866
373	77,3	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,62$	$r_{\text{к}} = 143$ $\alpha = 400\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 143$ $n = 1,59$	$r_{\text{к}} = 218$ $\alpha = 380\text{e-}4$	$r_{\text{н}} = 218$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 442$ $\alpha = 342\text{e-}4$	0,918	0,420	0,147	102	0,101	0,019	0,829

Оптические и микрофизические свойства смешанного дыма...

1	2	3		4		5		6	7	8	9	10	11	12
377	78,12	$r_H = 30$ $n = 1,59$	$r_K = 155$ $a = 270e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,59$	$r_K = 211$ $a = 290e-4$	$r_H = 211$ $n = 1,58$	$r_K = 376$ $a = 290e-4$	1,02	0,465	0,162	102	0,110	0,0295	0,841
382	79,2	$r_H = 30$ $n = 1,62$	$r_K = 138$ $a = 380e-4$	$r_H = 138$ $n = 1,59$	$r_K = 215$ $a = 350e-4$	$r_H = 215$ $n = 1,60$	$r_K = 622$ $a = 440e-4$	0,767	0,378	0,141	112	0,0939	0,0172	0,814
387	80,2	$r_H = 30$ $n = 1,63$	$r_K = 155$ $a = 520e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,59$	$r_K = 211$ $a = 380e-4$	$r_H = 211$ $n = 1,60$	$r_K = 376$ $a = 460e-4$	1,28	0,468	0,165	102	0,117	0,0199	0,783
390	80,9	$r_H = 30$ $n = 1,63$	$r_K = 145$ $a = 382e-4$	$r_H = 145$ $n = 1,61$	$r_K = 215$ $a = 539e-4$	$r_H = 215$ $n = 1,60$	$r_K = 612$ $a = 510e-4$	0,627	0,253	0,0934	111	0,0614	0,0111	0,792
394	81,7	$r_H = 30$ $n = 1,68$	$r_K = 129$ $a = 510e-4$	$r_H = 129$ $n = 1,60$	$r_K = 218$ $a = 510e-4$	$r_H = 218$ $n = 1,61$	$r_K = 568$ $a = 545e-4$	0,514	0,207	0,0766	111	0,0539	0,0095	0,781
400	82,9	$r_H = 30$ $n = 1,69$	$r_K = 127$ $a = 620e-4$	$r_H = 127$ $n = 1,62$	$r_K = 218$ $a = 620e-4$	$r_H = 218$ $n = 1,61$	$r_K = 582$ $a = 570e-4$	0,383	0,167	0,0655	118	0,0481	0,00788	0,757
411	85,9	$r_H = 30$ $n = 1,64$	$r_K = 155$ $a = 607e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,62$	$r_K = 340$ $a = 609e-4$	$r_H = 340$ $n = 1,67$	$r_K = 482$ $a = 660e-4$	0,305	0,154	0,0609	118	0,0455	0,00748	0,754
442	91,7	$r_H = 30$ $n = 1,59$	$r_K = 145$ $a = 258e-4$	$r_H = 145$ $n = 1,56$	$r_K = 215$ $a = 302e-4$	$r_H = 215$ $n = 1,70$	$r_K = 469$ $a = 336e-4$	0,721	0,337	0,1216	108	0,0774	0,0149	0,854
460	95,4	$r_H = 30$ $n = 1,57$	$r_K = 155$ $a = 115e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,57$	$r_K = 315$ $a = 215e-4$	$r_H = 315$ $n = 1,61$	$r_K = 456$ $a = 440e-4$	1,39	0,627	0,2171	104	0,1308	0,0281	0,897
487	101,1	$r_H = 30$ $n = 1,57$	$r_K = 156$ $a = 112e-4$	$r_H = 156$ $n = 1,57$	$r_K = 314$ $a = 216e-4$	$r_H = 314$ $n = 1,61$	$r_K = 456$ $a = 437e-4$	1,31	0,595	0,207	104	0,122	0,0265	0,896
520	107,9	$r_H = 30$ $n = 1,59$	$r_K = 155$ $a = 259e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,56$	$r_K = 314$ $a = 228e-4$	$r_H = 314$ $n = 1,61$	$r_K = 456$ $a = 600e-4$	1,10	0,494	0,171	104	0,102	0,0207	0,851
531	110,2	$r_H = 30$ $n = 1,53$	$r_K = 126$ $a = 265e-4$	$r_H = 126$ $n = 1,55$	$r_K = 315$ $a = 244e-4$	$r_H = 315$ $n = 1,63$	$r_K = 614$ $a = 560e-4$	1,25	0,468	0,164	105	0,0907	0,019	0,838
545	113,1	$r_H = 30$ $n = 1,52$	$r_K = 119$ $a = 100e-4$	$r_H = 119$ $n = 1,53$	$r_K = 331$ $a = 326e-4$	$r_H = 331$ $n = 1,64$	$r_K = 512$ $a = 681e-4$	2,56	1,01	0,379	112	0,209	0,0368	0,841
555	115,2	$r_H = 30$ $n = 1,67$	$r_K = 119$ $a = 100e-6$	$r_H = 119$ $n = 1,53$	$r_K = 331$ $a = 270e-4$	$r_H = 331$ $n = 1,63$	$r_K = 512$ $a = 655e-4$	2,24	0,98	0,397	121	0,243	0,0461	0,853
566	117,5	$r_H = 30$ $n = 1,70$	$r_K = 85$ $a = 100e-6$	$r_H = 85$ $n = 1,54$	$r_K = 319$ $a = 250e-4$	$r_H = 319$ $n = 1,64$	$r_K = 633$ $a = 643e-4$	3,55	1,65	0,604	110	0,361	0,0746	0,808
570	118,4	$r_H = 30$ $n = 1,58$	$r_K = 165$ $a = 453e-6$	$r_H = 265$ $n = 1,52$	$r_K = 316$ $a = 199e-4$	$r_H = 316$ $n = 1,65$	$r_K = 479$ $a = 606e-4$	5,26	2,21	0,841	114	0,468	0,095	0,795
579	120,2	$r_H = 30$ $n = 1,57$	$r_K = 167$ $a = 399e-6$	$r_H = 167$ $n = 1,54$	$r_K = 309$ $a = 261e-4$	$r_H = 309$ $n = 1,63$	$r_K = 612$ $a = 540e-4$	3,55	1,65	0,604	110	0,361	0,0746	0,808
586	121,7	$r_H = 30$ $n = 1,56$	$r_K = 248$ $a = 358e-4$	$r_H = 248$ $n = 1,61$	$r_K = 425$ $a = 412e-4$	$r_H = 425$ $n = 1,59$	$r_K = 694$ $a = 617e-4$	5,26	2,21	0,841	114	0,468	0,095	0,795
593	123,1	$r_H = 30$ $n = 1,56$	$r_K = 241$ $a = 310e-4$	$r_H = 241$ $n = 1,63$	$r_K = 436$ $a = 570e-4$	$r_H = 436$ $n = 1,59$	$r_K = 694$ $a = 590e-4$	5,01	2,18	0,818	116	0,443	0,0921	0,796
604	124,4	$r_H = 30$ $n = 1,69$	$r_K = 90$ $a = 300e-4$	$r_H = 90$ $n = 1,56$	$r_K = 312$ $a = 390e-4$	$r_H = 312$ $n = 1,62$	$r_K = 633$ $a = 551e-4$	5,42	2,18	0,848	116	0,503	0,105	0,797
629	130,6	$r_H = 30$ $n = 1,57$	$r_K = 168$ $a = 417e-4$	$r_H = 168$ $n = 1,53$	$r_K = 309$ $a = 321e-4$	$r_H = 309$ $n = 1,63$	$r_K = 629$ $a = 532e-4$	3,82	1,80	0,668	111	0,394	0,0796	0,794
643	133,6	$r_H = 30$ $n = 1,55$	$r_K = 155$ $a = 250e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,53$	$r_K = 309$ $a = 270e-4$	$r_H = 309$ $n = 1,62$	$r_K = 629$ $a = 550e-4$	2,72	1,32	0,513	117	0,279	0,0610	0,827
658	136,7	$r_H = 30$ $n = 1,54$	$r_K = 156$ $a = 470e-5$	$r_H = 156$ $n = 1,52$	$r_K = 311$ $a = 160e-4$	$r_H = 311$ $n = 1,60$	$r_K = 662$ $a = 490e-4$	3,53	1,73	0,686	119	0,355	0,0855	0,890
673	139,8	$r_H = 30$ $n = 1,53$	$r_K = 155$ $a = 107e-4$	$r_H = 155$ $n = 1,55$	$r_K = 310$ $a = 309e-4$	$r_H = 310$ $n = 1,60$	$r_K = 662$ $a = 539e-4$	8,75	4,13	1,61	117	0,828	0,185	0,844

Примечание.  $n$  – начальный радиус,  $k$  – конечный радиус фракции.

( $r \sim 300\text{--}650$  нм) частиц показатель поглощения почти на порядок ниже —  $\alpha_{2,3} \sim 0,06$ , что характерно для умеренно поглощающих аэрозолей (рис. 5, а). При выстаивании дыма до  $t \sim 10$  ч происходит почти 2-кратное увеличение показателей поглощения:  $\alpha_1$  — до  $\sim 0,8$ ,  $\alpha_2$  — до  $\sim 0,15$ , а для крупных частиц до  $\alpha_3 \sim 0,06$ . Следует отметить, что при последующей длительной эволюции дыма изменчивость показателей поглощения частиц становится менее выраженной. Их значения варьируют в пределах  $\alpha_1 \sim 0,8 \pm 0,6$  — для микродисперсной и  $\alpha_2 \sim 0,15$  — для среднедисперсной фракций (рис. 5, а, кривые 1 и 2). Однако для крупнодисперсных частиц показатель поглощения  $\alpha_3$  возрастает в 2 раза — от  $\sim 0,06$  до  $0,12$  (кривая 3).

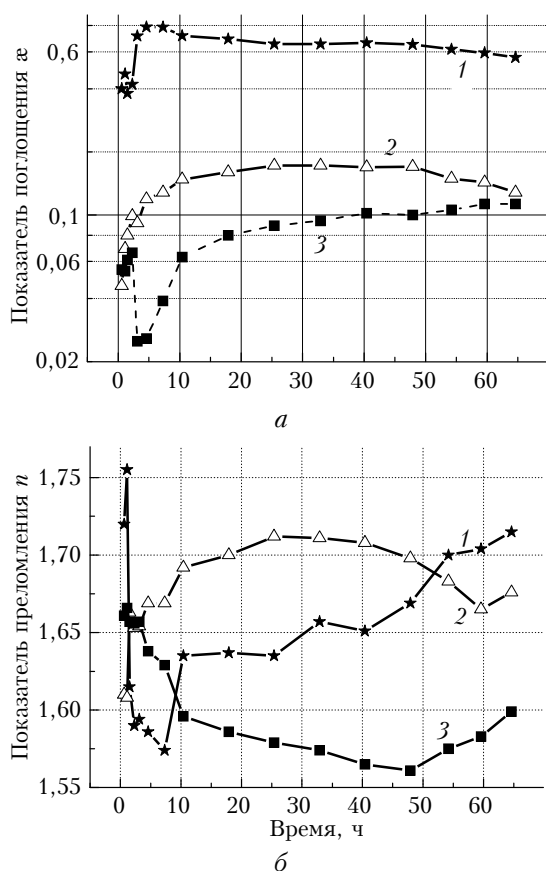


Рис. 5. Временные ходы КПП трех фракций частиц смешанного дыма в течение 3 сут эволюции дыма в БАК: а — показатель поглощения; б — показатель преломления частиц. 1 — микродисперсная, 2 — среднедисперсная, 3 — крупнодисперсная фракция

Из полученных данных следует, что поглощательная способность частиц смешанного дыма сильно изменяется в зависимости от их радиуса. Наибольшим поглощением обладает микродисперсная компонента. Для нее значения  $\alpha$  в 10 раз и более превышают значения показателя поглощения для умеренно поглощающей среднедисперсной фракции частиц, дающей основной вклад в объем дымового аэрозоля. Таким образом, на стадии формирования смешанного дыма сильно- и слабопоглощающая

компоненты значительно разнесены между собой на шкале размеров. При «старении» дыма происходит сдвиг верхней границы микродисперсной фракции со 120 до 240 нм (см. таблицу). Кроме того, увеличение  $\alpha_2(t)$  и  $\alpha_3(t)$  свидетельствует о «проникновении» микродисперсных сажевых частиц за счет коагуляции во второй и третий интервалы размеров. В совокупности отмеченные факторы приводят к тому, что поглощательная способность дыма в целом возрастает.

Пределы вариаций действительной части КПП частиц трех фракций составили от 1,55 до 1,75 (рис. 5, б). При выстаивании дыма для микродисперсных частиц (кривая 1) наблюдается рост показателя преломления  $n_1$  от 1,63 до 1,72. Оптически более «мягкими» являются крупнодисперсные частицы —  $n_3 \sim 1,55\text{--}1,60$ .

Из проведенного анализа следует, что микродисперсная фракция характеризуется высокими значениями поглощательной способности  $\alpha$  и «оптической жесткости» частиц  $n$ . Отметим, что КПП микродисперсной фракции частиц близок к известным литературным данным для сажи:  $m = 1,83 - i \cdot 0,74$  [19]. Полученный результат является показателем высокого содержания сажи в микродисперсных частях смешанных дымов. Также следует считать, что относительное содержание сажи в дымовых частицах уменьшается с ростом их размера. Это находит выражение в постепенном уменьшении значений  $\alpha$  при переходе к частицам средне-, а затем и крупнодисперсного диапазонов размеров (см. рис. 5, а). Наиболее вероятным объяснением этого эффекта является определяющая роль процесса интенсивной коагуляции и перераспределения микродисперсных сажевых частиц по всему спектру размеров при формировании смешанного дыма. Отметим, что значения мнимой части КПП для частиц смешанных дымов во всех диапазонах дисперсности существенно превышают наблюдаемые значения  $\alpha$  для пиролизных дымов [18].

Сильная поглощательная способность смешанных дымов обусловила низкие значения альбедо однократного рассеяния  $\omega$  на длине волны 525 нм (см. таблицу). Происходящие при выстаивании дыма расширение интервала размеров микродисперсной сильнопоглощающей фракции и интенсивное проникновение сажи в состав средне- и крупнодисперсных частиц приводят к уменьшению значений альбедо однократного рассеяния дыма  $\omega$  примерно от 0,61 до 0,47. Тенденция убывания альбедо является важным показателем того, что среднеэффективная (по полному спектру размеров) поглощательная способность частиц смешанного дыма возрастает в ходе его длительной эволюции.

Приведенные в таблице значения микрофизических характеристик отражают значительную динамику изменения интегральных параметров частиц  $N$ ,  $S$ ,  $V$  и  $r_{эф}$ , а также мнимой и действительной частей КПП по интервалам дисперсности, что предопределило изменчивость рассчитанных по теории Ми оптических характеристик  $\beta_e(t)$ ,  $\beta_r(t)$  и  $\omega(t)$ . По значениям объемного коэффициента ослабления и альбедо могут быть вычислены и величины объемных

коэффициентов аэрозольного рассеяния  $\beta_\sigma(t)$  и поглощения  $\beta_a(t)$ , важных для оценок радиационных потоков в атмосфере.

Анализ расчетных данных позволил установить, что в ходе временной динамики смешанных дымов между некоторыми оптическими характеристиками существуют статистически значимые корреляционные связи. На рис. 6 представлены диаграммы взаимной изменчивости объемных коэффициентов ослабления  $\beta_\epsilon(t)$  и обратного рассеяния  $\beta_\pi(t)$ , а также альbedo однократного рассеяния  $\omega(t)$  и эффективного радиуса частиц  $r_{эф}(t)$ .

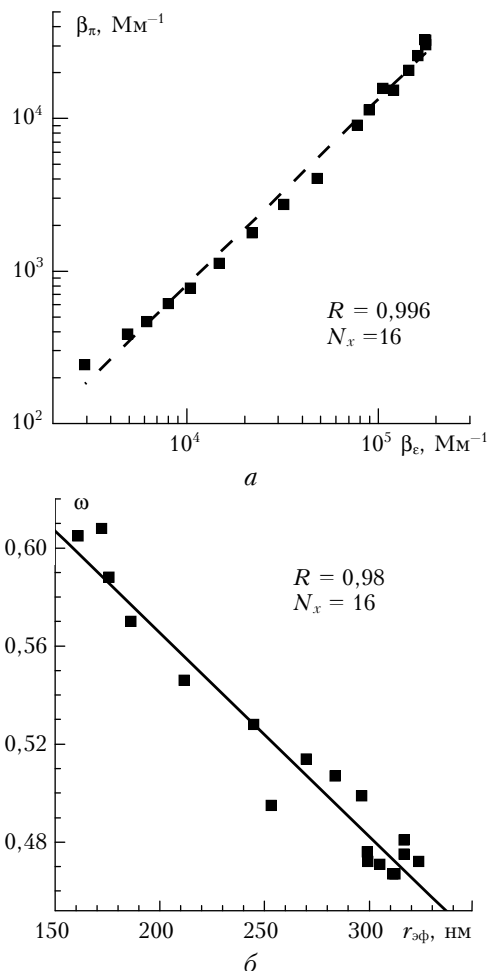


Рис. 6. Диаграммы корреляционной связи оптических и микрофизических характеристик смешанного дыма: *a* – связь между  $\beta_\epsilon(t)$  и  $\beta_\pi(t)$ ; *б* – связь между  $\omega(t)$  и  $r_{эф}(t)$

Отметим, что знание отмеченных корреляционных связей важно применительно к задачам локационного зондирования атмосферного аэрозоля [20–23]. Как видно, в процессе длительного выстаивания смешанного дыма (рис. 6, *a*) между характеристиками лидарного уравнения  $\beta_\pi(t)$  и  $\beta_\epsilon(t)$  прослеживается, с коэффициентом линейной корреляции между логарифмами величин  $R = 0,99$  ( $N_x$  – количество точек, соответствующих первым 16 строкам таблицы), степенная зависимость в виде

$$\beta_\pi = 0,53\beta_\epsilon^{1,26}. \quad (1)$$

Проявление в дымах тесных корреляционных связей различных оптических характеристик с коэффициентом аэрозольного ослабления служит определенным показателем применимости однопараметрического подхода, ранее проработанного для атмосферных дымок [24, 25], в целях создания аналогичной эмпирической однопараметрической модели смешанных дымов.

В смешанных дымах взаимосвязь вариаций альbedo однократного рассеяния  $\omega$  и эффективного радиуса частиц  $r_{эф}$  с высоким значением коэффициента корреляции  $R = 0,98$  ( $N_x = 16$ ) описывается линейной зависимостью (рис. 6, *б*):

$$\omega(t) = 0,74 - 8,6 \cdot e^{-3} r_{эф} (\text{нм}). \quad (2)$$

Дополнительные оценки показали, что на стадии очистки и заполнения БАК атмосферным воздухом (рис. 7, *a*) корреляционная связь объемных коэффициентов ослабления и обратного рассеяния также статистически значима и может быть описана линейным выражением с величиной лидарного отношения  $b_\pi \sim 0,22$  [20–22]:

$$\beta_\pi(t) = 0,22\beta_\epsilon(t). \quad (3)$$

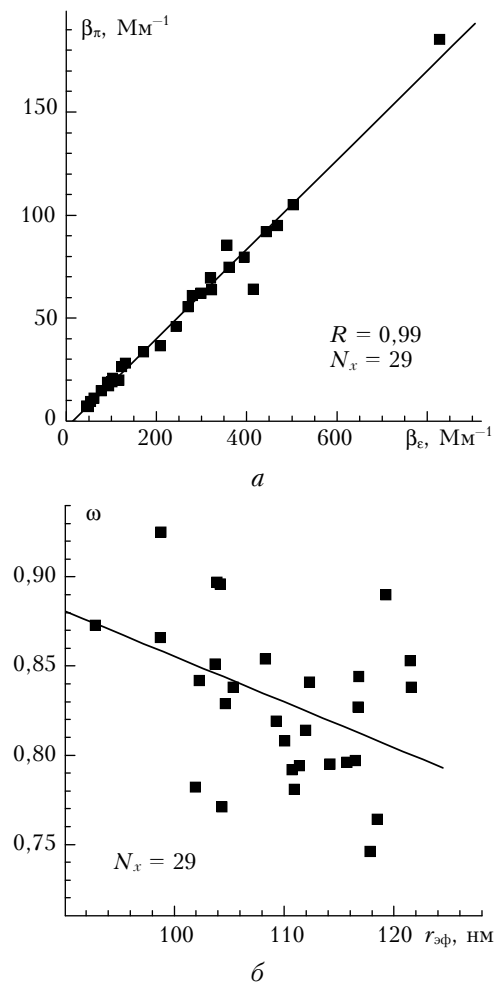


Рис. 7. Диаграммы корреляционной связи оптических и микрофизических характеристик смешанного дыма на стадии вентиляции БАК: *a* – связь  $\beta_\pi(t)$  и  $\beta_\epsilon(t)$ ; *б* – связь  $\omega(t)$  и  $r_{эф}(t)$



Из (3) следует вывод о том, что в условиях слабого замутнения взаимная изменчивость оптических характеристик фактически определялась только вариациями счетной концентрации частиц, тогда как значение нормированной индикатрисы локационного рассеяния оставалось неизменным.

Степень коррелированности изменений альbedo однократного рассеяния  $\omega$  и эффективного радиуса частиц  $r_{эф}$  на этапе очистки камеры от остатков дыма заметно снижается, и значение коэффициента линейной корреляции составляет лишь  $R = 0,56$  (рис. 7, б).

### Заключение

Результаты обращения данных оптических измерений свидетельствуют о высокой информативности метода поляризационной спектрофелометрии, позволяющего получить информацию о тонких особенностях вариаций оптических и микрофизических свойств дымов горения биомассы – лесных горючих материалов сибирских бореальных лесов. В ходе дымового эксперимента в Большой аэрозольной камере получен обширный массив данных о поляризационных спектрально-угловых характеристиках аэрозольного рассеяния в диапазоне длин волн 455–630 нм при длительной 3-суточной эволюции смешанного дыма.

Исследована временная динамика дисперсного состава и комплексного показателя преломления аэрозольных частиц на стадиях формирования и старения дымовой среды. Показано, что изменчивость оптико-микрофизических свойств смешанного дыма определяется динамикой неоднородной дисперсной смеси, состоящей из микродисперсной сажевой фракции и фракции умеренно поглощающих среднелдисперсных частиц. Особенности вариации спектра размеров и комплексного показателя преломления частиц в значительной степени обусловлены коагуляционной трансформацией дымового аэрозоля.

На основе численной экстраполяции полученной микрофизической информации расширен круг анализируемых радиационно-значимых параметров аэрозольного рассеяния. По теории Ми выполнены расчеты и проанализирована изменчивость таких оптических характеристик смешанных дымов, как коэффициент аэрозольного ослабления  $\beta_e(t)$ , обратного рассеяния  $\beta_\pi(t)$ , альbedo однократного рассеяния  $\omega(t) = \beta_s / \beta_e$  и лидарное отношение  $b_\pi = \beta_\pi / \beta_e$ . Оценены корреляционные связи различных оптических и микрофизических характеристик смешанного дыма.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-00395).

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. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 237 с.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.

4. Самсонов Ю.Н., Беленко О.А., Иванов В.А. Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 423–431.
5. Аэрозоль и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 542 с.
6. Розенберг Г.В. Тонкодисперсный аэрозоль и климат // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18, № 11. С. 1192–1198.
7. Jacobson M.Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols // Nature (Gr. Brit.). 2001. V. 409. P. 695–697.
8. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–568.
9. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of Black Carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 11. P. 2611–2620.
10. Bond T.C., Bergstrom R.W. Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review // Aer. Sci. and Technol. 2006. V. 40, N 1. P. 27–67.
11. 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. 183–190.
12. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Вариации оптических постоянных и спектра размеров дымовых аэрозолей, образованных при термическом разложении разнородных древесных материалов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 248–258.
13. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Козлов В.С. Влияние коры древесных материалов на оптико-микрофизические свойства пиролизных дымов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 412–418.
14. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.В. Оптико-микрофизические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 675–684.
15. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофелометрических измерений в смешанных дымах // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897.
16. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Тумаков А.Г., Панченко М.В., Рахимов Р.Ф. Угловой поляризационный спектрофелометр APSN-02 для изучения оптико-микрофизических свойств атмосферного субмикронного аэрозоля // Аэрозоли Сибири. XVIII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. 78.
17. Макиенко Э.В., Наац Э.В. Обратные задачи аэрозольного светорассеяния применительно к лазерной локации атмосферных загрязнений приземного слоя // Проблемы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 42–51.
18. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства пиролизного дыма по данным оптических измерений 4-волновым спектрофелометром // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1045–1053.
19. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.

20. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э. Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 3. Спектральные особенности вертикального распределения оптических характеристик аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 216–223.
21. Бычков В.В., Пережогин А.С., Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Марицев В.Н., Матвиенко Г.Г., Белов А.С., Черемисин А.А. Лидарные наблюдения появления аэрозолей в средней атмосфере Камчатки в 2007–2011 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 87–93.
22. Матвиенко Г.Г., Погодаев В.А. Оптика атмосферы и океана – неоконченный урок взаимодействия оптического излучения со средой распространения // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 5–10.
23. Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М., Бураков В.Д., Веретенников В.В., Кауль Б.В., Креков Г.М., Марицев В.Н. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 915–930.
24. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
25. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В., Фадеев В.Я. Применение однопараметрической модели дымки в задачах лазерного зондирования // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 2. С. 25–32.

*R.F. Rakhimov, V.S. Kozlov, A.G. Tumafov, V.P. Shmargunov.* **Optical and microphysical properties of the mixed smoke according to the polarization spectronephelometric measurements.**

A polarization spectronephelometer was used for measurements of spectral coefficients of angular aerosol scattering in mixed smokes during their 3-day evolution in the Large Aerosol Chamber of IAO SB RAS (1800 m<sup>3</sup>). The smokes were formed as a mixture of products of thermal decomposition of coniferous wood materials (pine) from sources of low-temperature pyrolysis (~400 °C) and high-temperature open combustion with flame (~800°C). The inverse problem was solved to study peculiarities in formation of the disperse composition of smokes and the complex refractive index of smoke particles for three size ranges.

It is shown that the dynamics of formation and evolution of mixed smokes is determined mostly by the contribution of the strongly absorbing ultra-fine fraction (particle radius of <150 nm, the imaginary part of the refractive index of particulate matter of ~0.4–0.8 close to that of black carbon) to the optical properties. Medium and coarse particles (radius of > 200 nm) are moderately and weakly absorbing; the imaginary part of refractive index is ~0.03–0.15. The absorptivity of mixed smoke is high, and the single scattering albedo at the wavelength 525 nm achieves low values of ~0.60–0.45, decreasing during the smoke storage.

At the smoke generation, bimodal particle size distributions with the medium of 350–400 nm and coarse of ~760 nm modes are formed. After long storage of the smoke, the particle size spectrum is characterized by a single mode of ~600 nm, and the effective radius of the particles increases from 160 nm to 330 nm.

It is shown that the mutual dynamics between the volume backscattering and extinction coefficients, single scattering albedo and effective radius of particles are described by statistically significant linear correlations.