

УДК 551.510.42

Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции

В.С. Козлов, Р.Ф. Рахимов, В.П. Шмаргунов*

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

Поступила в редакцию 2.03.2017 г.

В Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН (объем 1800 м³) исследована изменчивость оптико-микрофизических характеристик смешанного древесного дыма при его длительном старении в течение 6 сут в условиях периодических воздействий переменной относительной влажности воздуха в диапазоне 45–95%. По результатам спектронефелометрических измерений углового рассеяния и решения обратной задачи проанализирована динамика распределений по размерам и комплексных показателей преломления для микро-, средне- и крупнодисперсных фракций частиц, а также их эффективного радиуса, параметра локационного рассеяния и альbedo однократного рассеяния в видимой области спектра. Установлено, что на различных стадиях старения дыма как количественные, так и качественные особенности вариаций его оптико-микрофизических характеристик в зависимости от влажности воздуха значительно изменяются. Показано, что при старении смешанного дыма основными факторами изменчивости его свойств являются физико-химическая разнородность трех фракций дымовых частиц, а также физические процессы коагуляционной миграции микродисперсной сажи (размерами < 100 нм) по спектру размеров и конденсационного обводнения частиц. Взаимосвязанное воздействие «интерференция» отмеченных процессов на структуру частиц определяет основные особенности динамики дисперсного состава и поглощающих свойств дымовых частиц.

Ключевые слова: смешанный дым, относительная влажность воздуха, поляризационный спектронефелометр, обратная задача, оптические и микрофизические характеристики частиц, сажа; mixed smoke, relative humidity of air, polarization spectronephelometer, inverse problem, optical-microphysical characteristics of particles, soot.

Введение

Изменчивость оптико-микрофизических свойств атмосферного аэрозоля модулируется вариациями такого важного локального геофизического фактора, как относительная влажность воздуха [1–5]. Значительный интерес представляют исследования конденсационных свойств дымовых аэрозолей, генерируемых в ходе многочисленных природных и антропогенных процессов горения углеводородных топлив: эмиссии автомобильного транспорта, морских судов, авиации, промышленных предприятий, тепловых станций, частного сектора в отопительные сезоны, горения биомассы при лесных пожарах и др. [6–12]. Задача становится особенно актуальной, поскольку процессы горения являются основными источниками поступления в состав атмосферного аэрозоля сажевой компоненты, которая сильно воздействует на радиационный форсинг в атмосфере и климатические изменения [13–17].

В настоящей работе обсуждаются результаты эксперимента по изучению особенностей изменения реакции (отклика) оптических и микрофизических характеристик смешанного древесного дымового аэ-

розоля на вариации относительной влажности воздуха в ходе длительной эволюции дыма, проведенного в Большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН объемом 1800 м³. Основным инструментом исследования является метод поляризационной спектронефелометрии рассеянного света в видимой области спектра, который эффективен для изучения спектральных коэффициентов рассеяния и дисперсного состава частиц в диапазоне размеров от 0,04 до 2,50 мкм. Нефелометрический метод высокоинформативен при оценках оптико-микрофизических характеристик частиц, позволяя: 1) получать массивы спектральных коэффициентов углового рассеяния для оптимального набора длин волн и углов рассеяния; 2) на основе измеренной информации с приемлемой погрешностью решать обратную задачу по определению дисперсного состава (распределения частиц по размерам) и изменчивости комплексного показателя преломления (КПП) вещества частиц $m = n - i\chi$ для различных диапазонов размеров (n и χ – показатели преломления и поглощения) [18–20]. В работе анализируются особенности временной динамики измеренных и рассчитанных оптико-микрофизических параметров дымового аэрозоля в условиях «сухой» трансформации дыма в аэрозольной камере и на стадиях периодического воздействия на аэрозоль посредством контролируемого изменения относительной влажности воздуха в пределах 45–95%.

* Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Рустам Фуатович Рахимов (temur@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vprsh@iao.ru).

Аппаратура и методика эксперимента

Смешанный дым создавался при постепенном заполнении аэрозольной камеры смесью дымов режимов тления (400 °С) и пламенного горения (700 °С) древесины сосны в двух муфельных печах в течение 1 ч. Дымовые частицы, эмитируемые двумя разными источниками горения, поступали в замкнутой объем БАК, смешивались и равномерно распределялись по всему объему камеры. Смешанный дым прокачивался из БАК с помощью воздушной помпы в специально разработанный увлажнитель аэрозоля, который под управлением рабочей программы компьютера обеспечивал контролируемые циклы возрастания и уменьшения относительной влажности воздуха RH в пределах от 45 до 95% (рис. 1). Из увлажнителя 1 дым поступал в камеру спектрофелометра 4 объемом 100 л и возвращался в БАК. В ходе дымового эксперимента аэрозоль периодически, через каждые 10 ч, подвергался 2-часовому «циклическому» воздействию возрастающей/убывающей влажности воздуха. Измерения в смешанном дыме выполнялись непрерывно в течение 6 сут его эволюции в БАК.

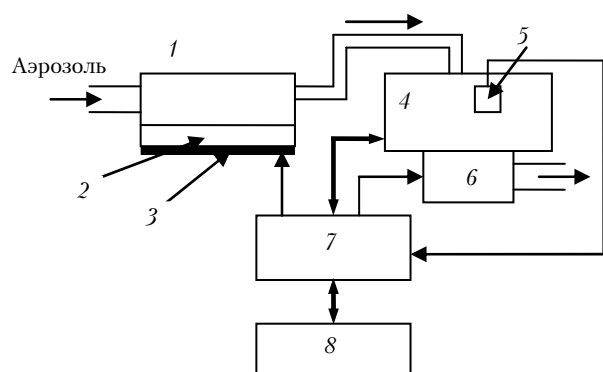


Рис. 1. Блок-схема увлажнителя дымового аэрозоля: 1 – увлажнитель; 2 – нагреватель; 3 – слой воды; 4 – камера спектрофелометра; 5 – датчик влажности; 6 – воздушная помпа; 7 – блок управления; 8 – компьютер

Коэффициенты углового аэрозольного рассеяния $\beta(\lambda_i, \theta_j)$, $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ непрерывно измерялись разработанным в ИОА СО РАН спектрофелометром АПСН-02 4 в автоматизированном режиме с периодичностью 7–10 мин, последовательно для длин волн $\lambda_i = 455; 525; 585; 630$ нм, углов рассеяния $\theta_j = 15; 45; 110; 135; 165^\circ$ и двух ортогональных состояний поляризации [20]. Высокая чувствительность и стабильность измерений спектральных коэффициентов углового рассеяния на уровне молекулярного рассеяния света достигается за счет применения мощных 4-цветных светодиодов типа LZ4-20MA10, контроля их интенсивности, процедур вычитания темновых сигналов, накопления полезного сигнала, а также использования современного фотоприемника типа Hamamatsu H7468. Нефелометр последовательно регистрировал 40 элементов вектора измерений в течение единичного цикла (3–7 мин) с погрешностью 3%.

По данным измерений $\beta(\lambda_i, \theta_j)$ решалась обратная задача [18] и для субфракций микро- (30–100 нм), средне- (100–220 нм) и крупнодисперсных (200–550 нм) частиц определялись распределения их сечения и объема по размерам (радиусам), а также КПП. Затем по теории Ми рассчитывались эффективный радиус частиц, коэффициенты аэрозольного ослабления, рассеяния и локационного рассеяния, альbedo однократного рассеяния в видимой области спектра.

Результаты измерений

Анализ результатов показал, что методика циклического влажностного воздействия позволяет подробно рассмотреть особенности динамики параметров аэрозоля в условиях «слабой» ($RH \leq 60\%$) и «сильной» ($RH > 60\%$) конденсационной изменчивости на различных стадиях эволюции дыма в ходе смешения продуктов тления и пламенного горения. На рис. 2 для различных длин волн приведены временные развертки спектральных коэффициентов углового рассеяния $\beta_s(t)$ под углом рассеяния $\theta = 15^\circ$ – на начальной стадии (рис. 2, а) и под углом $\theta = 45^\circ$ – на заключительной стадии старения смешанного дыма (рис. 2, б).

Временные зависимости иллюстрируют динамику оптических характеристик при низких значениях RH (пологие участки) и оптическую реакцию увлажненного дымового аэрозоля на циклы возрастания и уменьшения RH на различных стадиях эволюции. Аналогичные особенности временной изменчивости коэффициентов рассеяния для различных длин волн и углов рассеяния свидетельствуют о том, что при выстаивании дыма в БАК происходит значительное уменьшение оптической плотности дисперсной смеси за счет оседания частиц на стенках камеры, а также трансформация микроструктуры аэрозольных частиц. Спектральные коэффициенты рассеяния за 50 ч эволюции дыма уменьшаются более чем в 3 раза для угла $\theta = 15^\circ$, а для угла $\theta = 45^\circ$ в конце эксперимента в среднем в 2 раза.

На рис. 3 представлены зависимости изменения $\beta_s(525 \text{ нм})$ для угла рассеяния 45° на стадиях возрастания и убывания относительной влажности в окрестности 2-, 8- и 10-го максимумов влажностного воздействия (13, 84 и 107 ч соответственно). На начальной стадии старения смешанного дыма при достаточно высоких концентрациях аэрозольных частиц и их активном стоке на стенки БАК отчетливо проявляется сильное различие формы кривых при возрастании и убывании влажности воздуха (рис. 3, а), что служит показателем значительного влияния стока частиц на динамику коэффициента углового рассеяния. По мере старения дыма концентрация оптически активных частиц постепенно стабилизируется и динамика $\beta_s(t)$ в основном определяется фактором влажностной изменчивости (рис. 3, б). В этом случае кривые $\beta_s(RH)$ на участках циклического возрастания и убывания влажности взаимно

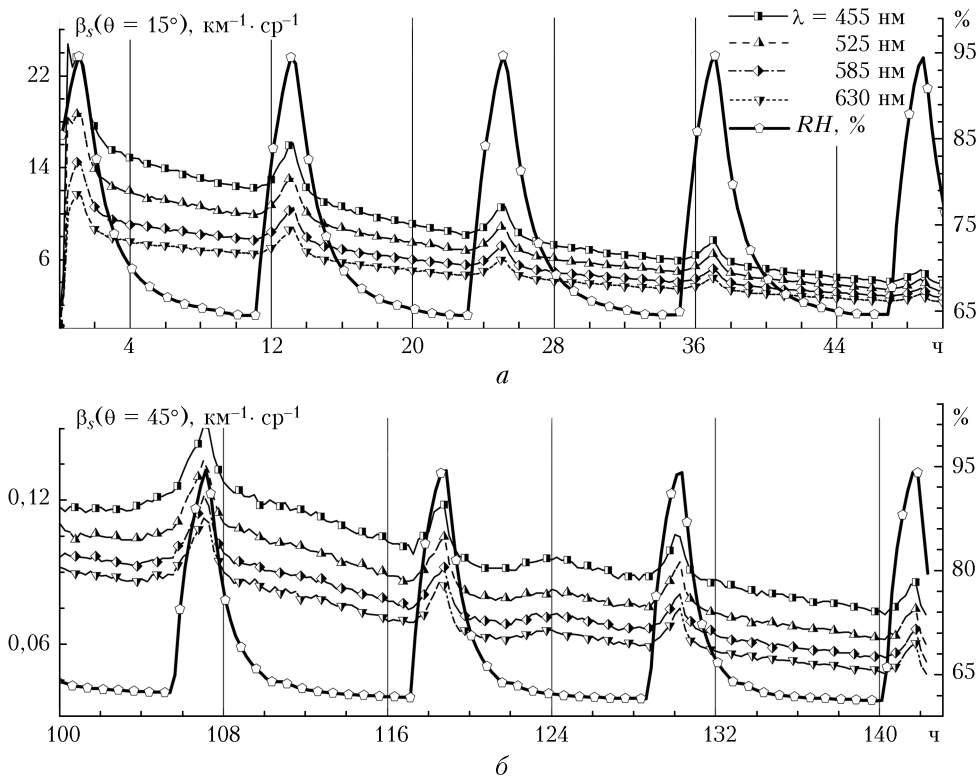


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента углового аэрозольного рассеяния $\beta_s(t)$ в смешанном древесном дыме в начале дымового эксперимента под углом $\theta = 15^\circ$ (а); на заключительной стадии старения под углом рассеяния $\theta = 45^\circ$ (б)

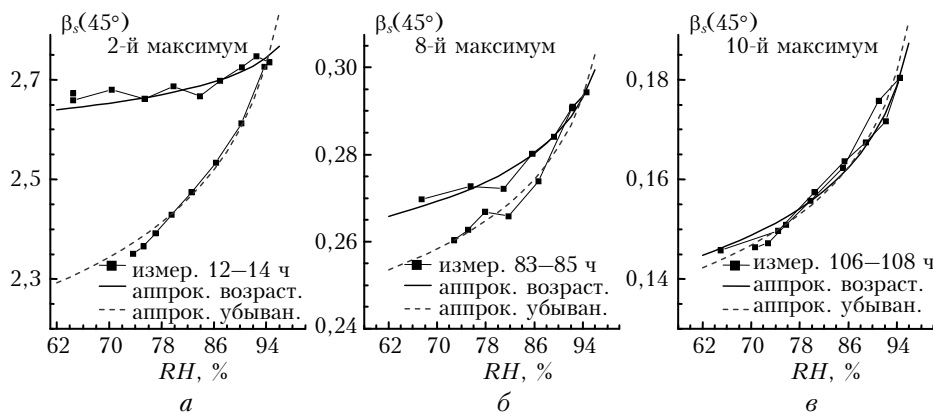


Рис. 3. Динамика β_s (525 нм; 45° ; RH) на участках возрастания и убывания относительной влажности в окрестности 13 (а), 84 (б) и 107 ч (в) старения дыма

сближаются. Именно на стадиях выстоявшегося дыма, когда роль «сухой» трансформации частиц становится минимальной, целесообразно выполнять оценки гигроскопических свойств дымового аэрозоля. Приведенные на рис. 3 зависимости были аппроксимированы по формуле Хенела [21], определяющей взаимосвязь аэрозольного коэффициента рассеяния с относительной влажностью воздуха:

$$\beta_s = \beta_{s0}(1 - RH/100)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где $\beta_{s0} = \beta_s(RH = 0)$ – коэффициент углового рассеяния сухой основы аэрозоля; γ – параметр конденсационной активности аэрозольных частиц, ха-

рактеризующий активность их обводнения в поле переменной влажности воздуха.

Полученные значения параметров аппроксимационной формулы (1) приведены в таблице для циклов воздействия влажности № 1–13 ($t = 0–143$ ч), отдельно на участках возрастания и убывания относительной влажности воздуха.

Из таблицы видно, что полученные на стадии выстоявшегося дыма (около 4,5 сут) значения параметра конденсационной активности невысоки, $\gamma \sim 0,10–0,13$. Такие результаты свидетельствуют о низкой конденсационной активности частиц смешанного древесного дыма и согласуются с оценками γ , полученными ранее в плотной дымовой мгле

сибирских лесных пожаров [9, 10]. Отметим, что для реального атмосферного аэрозоля в фоновых условиях значения γ варьируются в течение года в зависимости от состава частиц в пределах 0,2±0,6 [2]. Полученные значения параметра конденсационной активности частиц смешанного древесного дыма в среднем в 2 раза ниже минимальных значений, характерных для фонового атмосферного аэрозоля в летних условиях $\gamma \sim 0,24$ [10].

Параметры формулы Хенела для циклов воздействия RH на различных стадиях старения смешанного дыма (отсчет времени от начала первого цикла возрастания влажности)

№ max	t, ч	γ	β_{s0} , км ⁻¹ · ср ⁻¹		
			Возрастание RH	Убывание RH	
1	0–2	—	—	0,138	2,918
2	12–14	0,021	2,585	0,094	2,091
3	24–26	0,024	1,670	0,074	1,450
4	36–38	0,018	1,208	0,079	1,020
5	48–50	0,027	0,817	0,070	0,726
6	60–62	0,017	0,596	0,080	0,503
7	72–74	0,023	0,402	0,048	0,362
8	84–86	0,052	0,252	0,078	0,235
9	96–98	0,028	0,163	0,083	0,141
10	106–108	0,114	0,129	0,132	0,125
11	118–120	0,078	0,108	0,133	0,094
12	129–131	0,091	0,093	0,129	0,087
13	141–143	0,088	0,077	—	—

Результаты решения обратной задачи на основе спектрофелометрических измерений (в том числе приведенные на рис. 2) подтверждают отмеченную ранее [19, 20] значительную неоднородность смешанного дыма как по дисперсному составу, так и по значениям оптических постоянных фракций (показатели преломления и поглощения вещества частиц), которые изменяются в течение всего эксперимента. Пофракционная оценка значений КПП частиц смешанного дыма показала, что помимо двух фракций, существенно различающихся по поглощению (тонкодисперсная и умеренно поглощающая крупная), в составе крупной фракции целесообразно учитывать промежуточную субфракцию. Из оценок следует, что для такой среднечисленной фракции на начальной стадии эволюции дыма значение мнимой части показателя преломления примерно вдвое превышает аналогичное значение для крупнодисперсных частиц. Указанные различия выявляются в процессе поиска минимума функционала отклонений между измеренными и восстановленными значениями спектрально-угловых зависимостей коэффициентов углового рассеяния. В результате применения трехфракционного подхода не только уменьшается (на 30–40%) общая невязка решения обратной задачи, но и улучшается оценка значений КПП для тонкодисперсной фракции за счет более точного определения диэлектрических свойств умеренно поглощающей фракции смешанных дымов.

Рис. 4 иллюстрирует динамику изменения распределения сечения dS/dr и объема dV/dr дымовых

частиц (где V – суммарный объем, а S – суммарное сечение), восстановленных по результатам решения обратной задачи в районе третьего цикла возрастания относительной влажности воздуха (см. рис. 2, а). Из представленных на рис. 4 зависимостей видно, что на начальной стадии эволюции дыма с ростом RH происходят устойчивое уменьшение поверхностной и объемной концентраций тонкодисперсных частиц радиусами $r < 180–190$ нм и увеличение содержания частиц радиусами $r > 220$ нм.

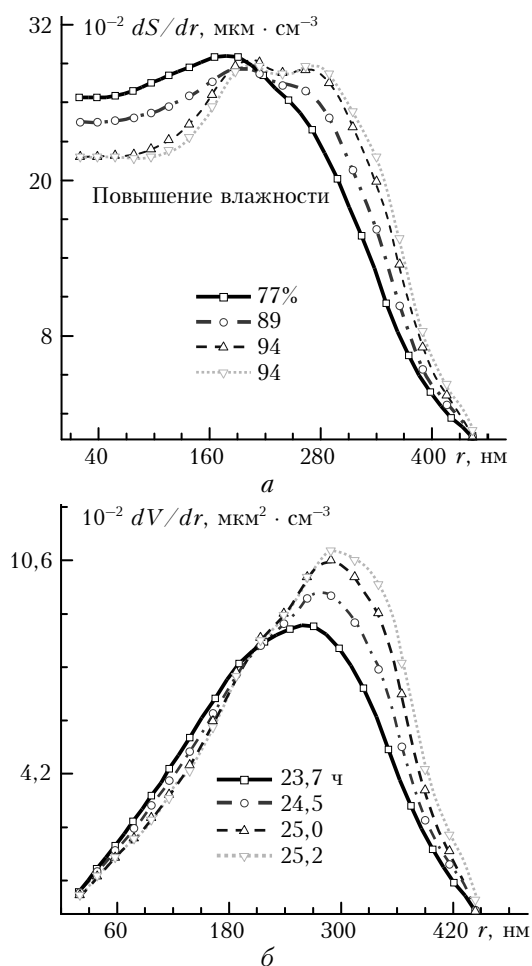


Рис. 4. Изменчивость дисперсного состава смешанного дыма на стадии повышения относительной влажности воздуха: а – сечение частиц; б – объем частиц

На стадии снижения относительной влажности воздуха наблюдается обратный процесс (рис. 5). Следует предположить, что близкая к симметричной обратная динамика изменения распределений сечения и объема частиц по размерам на стадиях роста/убывания RH обусловлена конденсационным укрупнением дымовых частиц (при увлажнении) и уменьшением их размеров при «обсыхании». При этом реакция распределений по размерам на циклические вариации влажности воздуха описывается сдвигом распределений по шкале размеров, т.е. прямым либо обратным стоком – обменом частицами между поддиапазонами размеров $r < 180–190$ нм и $r > 220$ нм.

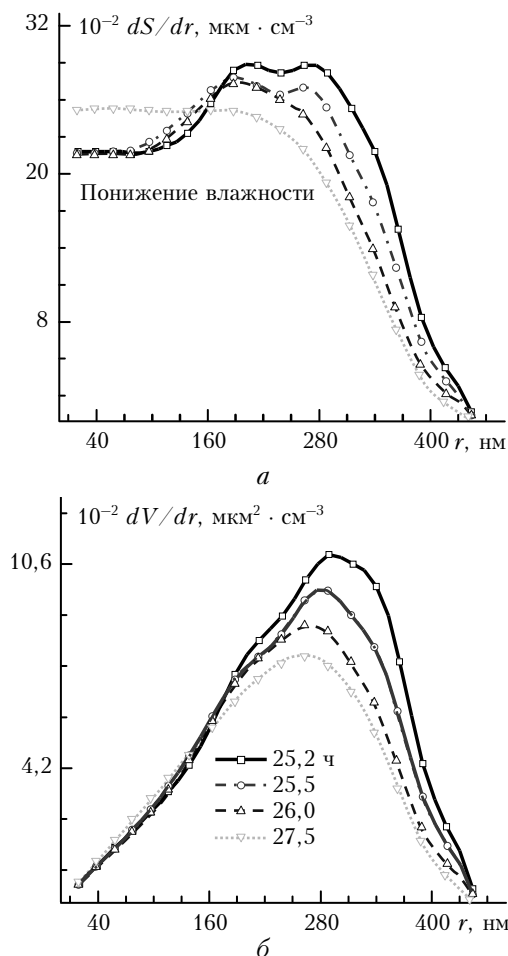


Рис. 5. Изменчивость дисперсного состава смешанного дыма на стадии уменьшения относительной влажности воздуха: *a* – сечение частиц; *б* – объем частиц

Результаты обращения решения обратной задачи в промежутках между циклами воздействия относительной влажности воздуха показывают, что временная динамика дисперсного состава сухого смешанного дыма характеризуется устойчивым уменьшением концентраций во всем диапазоне размеров, что свидетельствует об активном осаждении частиц (в большей степени мелких) на стенки БАК (рис. 6.).

Представленные на рис. 7 зависимости аэрозольных характеристик, полученные по результатам решения обратной задачи, показывают, что реакция смешанного дыма на циклические колебания относительной влажности RH заметно меняется по ходу эксперимента. При 6-суточной эволюции дыма особенности изменчивости для диапазонов низкой влажности воздуха и периодов воздействия RH кардинально отличаются. При невысоких влажностях отчетливо прослеживается долговременная динамика «сухого» смешанного дыма. На рис. 7, *a* видно, что эффективный радиус частиц $r_{эф} = 3V/4S$ на начальной стадии ($\sim 1/2$ сут) смешения продуктов тления и горения древесины возрастает от 155 до 180 нм, достигает максимума на 2-е сут эволюции и затем уменьшается до 150 нм,

иллюстрируя тем самым характерную динамику трансформации сухих дымовых частиц при выстаивании в закрытом объеме БАК [19, 20]. Альbedo однократного рассеяния ω на длине волны 525 нм уменьшается от 0,89 до 0,73, достигает минимума на 3-и сут и затем возрастает до 0,86 (рис. 7, *б*). При низких влажностях подобная динамика наблюдается также и для параметра лидарного отношения (рис. 7, *в*).

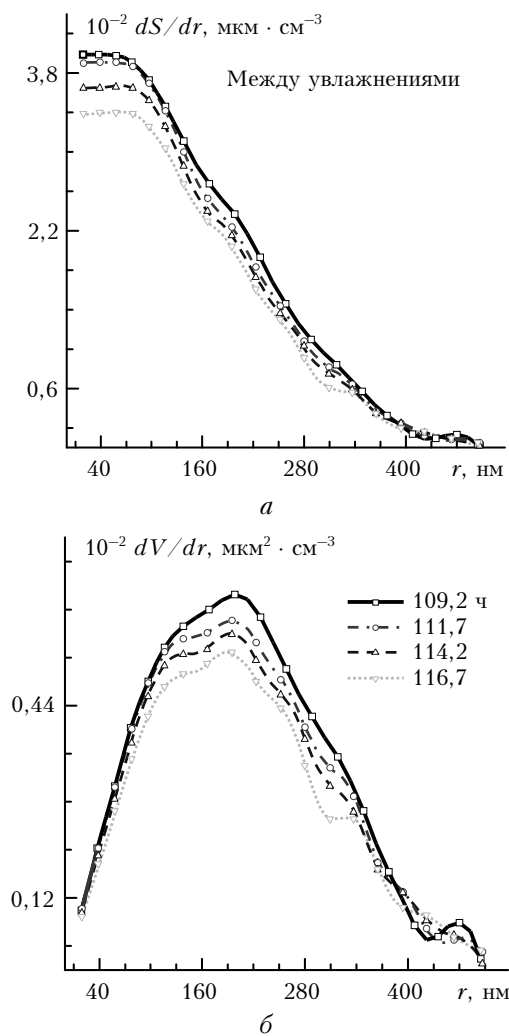


Рис. 6. Изменчивость дисперсного состава дыма между циклами увлажнения: *a* – сечение частиц; *б* – объем частиц

Реакция параметров дымового аэрозоля на циклические вариации относительной влажности заметно меняется на разных стадиях эксперимента. Воздействие RH на эффективный радиус частиц приводит к появлению на временных зависимостях локальных максимумов, которые отражают укрупнение частиц с увеличением RH , приводящее к росту $r_{эф}$ в среднем на 25–30 нм (рис. 7, *a*). Альbedo однократного рассеяния увеличивается при увлажнении на 0,02–0,03 в течение первых 3 сут старения дыма, но на последующей стадии старения в условиях значительного уменьшения плотности дыма и концентрации тонкодисперсной фракции частиц

наблюдается эффект повышенного влажностного возрастания ω на 0,05–0,08 (рис. 7, б). Лидарное отношение уменьшается под воздействием влажности в течение 3 сут на 0,02 и при дальнейшей эволюции дыма меняется слабо (рис. 7, в).

Рис. 8 иллюстрирует временную динамику значений мнимой части КПП для трех фракций дымовых частиц $\chi_i(t)$, полученную по результатам решения обратной задачи. Приведенные данные показывают, что изменчивость поглощающих свойств как неувлажненного, так и увлажненного дыма в значительной степени определяется процессом миграции тонкодисперсных частиц сажи (менее 30–100 нм) по всему спектру размеров. Следует отметить, что хотя дымовые частицы нанометрового диапазона (до 30 нм) дают малый оптический вклад и их дисперсный состав не удается восстановить при решении обратной задачи, они активны в процессах коагуляции и их участие прослеживается в динамике мнимой части КПП исследуемых фракций частиц.

Именно повышение значений χ_1 , χ_2 и χ_3 для сухого дыма на начальном этапе эксперимента сви-

детельствует об активной коагуляционной миграции частиц поглощающей сажевой компоненты из области размеров 30–100 нм и мельче, где ее концентрация высока, в диапазон умеренно поглощающих частиц крупнее 100 нм. Следует считать, что именно коагуляционный процесс миграции частиц определяет качественное согласие временной динамики изменений $\chi_i(t)$ и $r_{эф}(t)$. Так, из рис. 8, в видно, что наиболее активно «перекачка» сажи в оптически активный диапазон размеров происходит на начальных стадиях эволюции сухого дыма и приводит к тому, что значения χ_i для трех фракций возрастают в течение первых 2–3 сут, достигая максимумов $\chi_1 \sim 0,85$, $\chi_2 = 0,06$, $\chi_3 = 0,05$, а затем уменьшаются. Наибольшая эффективность проникновения тонкодисперсных поглощающих частиц в состав умеренно поглощающей фракции $200 < r < 550$ нм достигает максимума по величине χ_2 на 2-е сут (рис. 8, б), а по χ_3 лишь на 3-и сут старения дыма (рис. 8, в). Аналогичная динамика сухого дыма наблюдается и для тонкодисперсной фракции χ_1 (рис. 8, а).

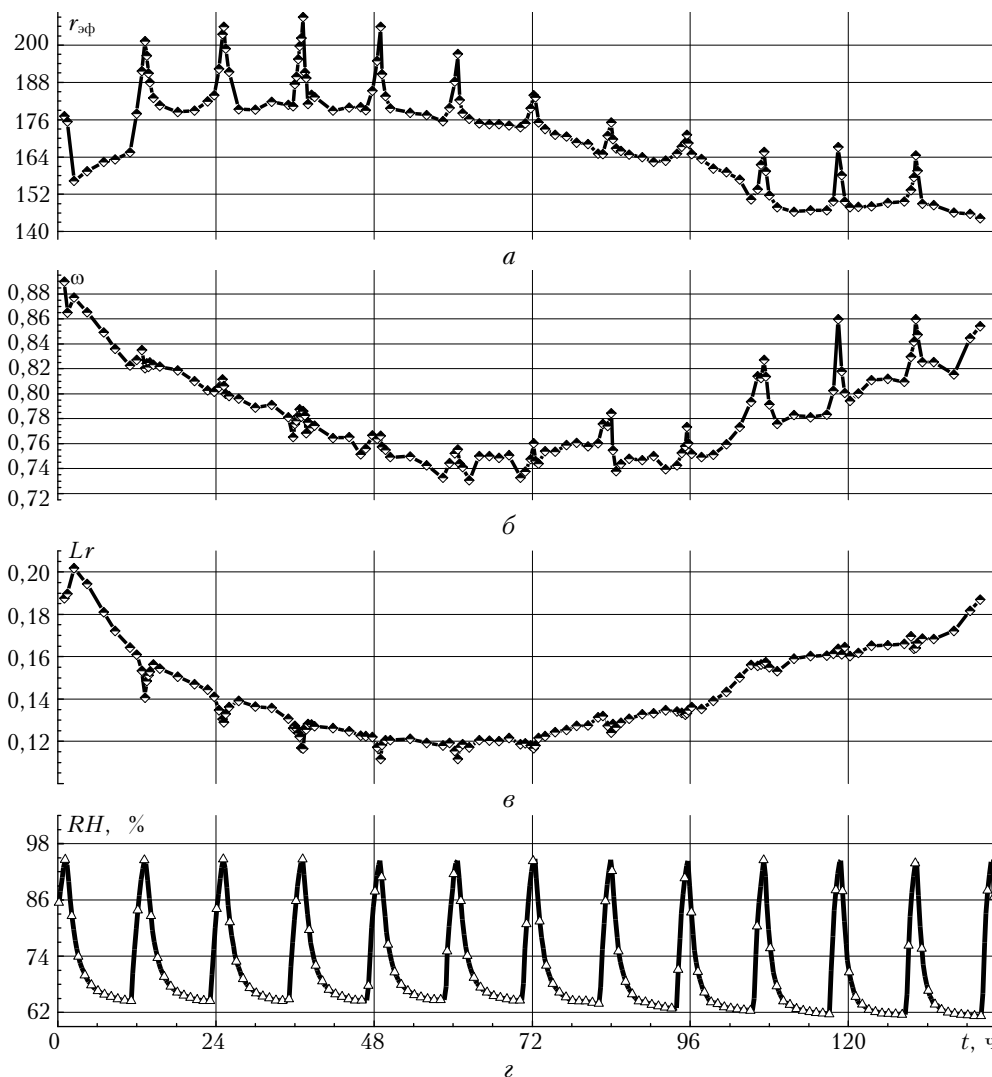


Рис. 7. Изменения эффективного размера частиц $r_{эф}$ (а); альbedo однократного рассеяния ω (б); лидарного отношения Lr (в); с относительной влажностью RH (г)

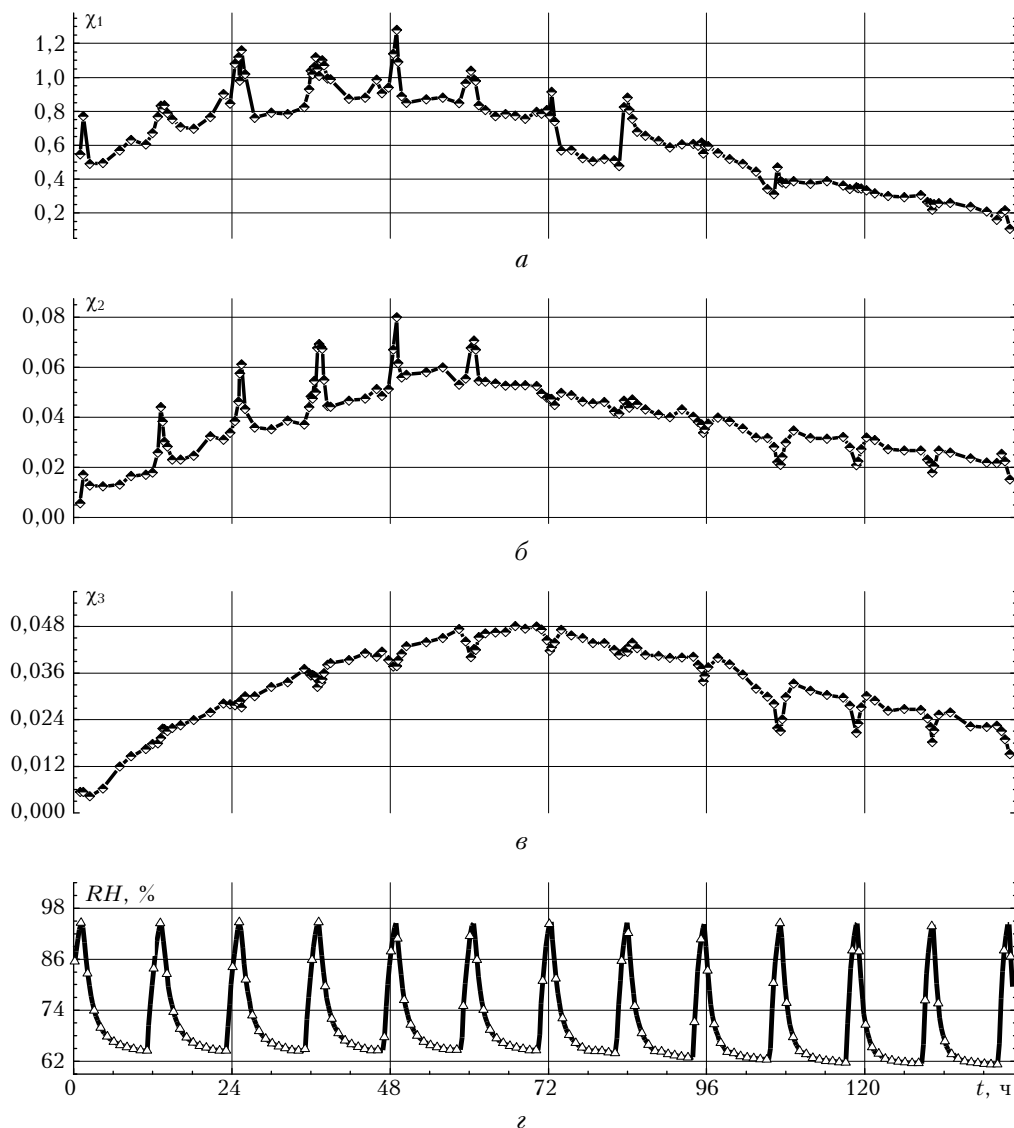


Рис. 8. Изменчивость мнимой части КПП χ на стадиях сухой трансформации и влажностного воздействия для: тонкодисперсной фракции $r < 95$ нм (а); среднелдисперсной фракции $100 < r < 210$ нм (б); крупных частиц $r > 210$ нм (в). Динамика относительной влажности (г)

Влажностное воздействие на динамику χ_1 и χ_2 активно проявляется в 1-е–3-и сут эволюции дыма и стимулирует дополнительный рост показателей поглощения вещества частиц за счет миграции сажи. Затем отмеченный характер воздействия влажности, приводящий к усилению поглощающих свойств частиц, меняется на качественно противоположный – значения $\chi_{1,2}$ уменьшаются с ростом RH , что объясняется проникновением воды в состав частиц и их конденсационным укрупнением. Влияние тонкодисперсной поглощающей фракции на динамику χ_2 и χ_1 с ростом относительной влажности постепенно ослабевает. Отметим, что наиболее слабая реакция крупнодисперсных частиц на изменения RH наблюдается начиная со 2-х сут старения дыма и до конца эксперимента; она проявляется в конденсационном уменьшении значений χ_3 (см. рис. 8, в).

Отмеченные признаки повышения влажностного воздействия за счет коагуляционной миграции сильно поглощающей микродисперсной сажевой компоненты по спектру размеров либо конденсационного прироста содержания воды в составе аэрозоля прослеживаются и во временной динамике действительной части КПП (показателя преломления вещества дымовых частиц n_i) (рис. 9).

Для крупнодисперсных частиц при возрастании RH до 95% значение n_3 уменьшается от 1,57 до 1,48, что объясняется конденсационным увеличением объема воды в составе частиц. Аналогичная конденсационная динамика n_2 характерна и для среднелдисперсных частиц. Воздействие поглощающей сажевой компоненты при увлажнении дыма просматривается лишь для микродисперсных частиц, в динамике n_1 , в течение 2-х сут, а затем ослабевает. Влияние водной компоненты на изменения n_1 не наблюдалось.

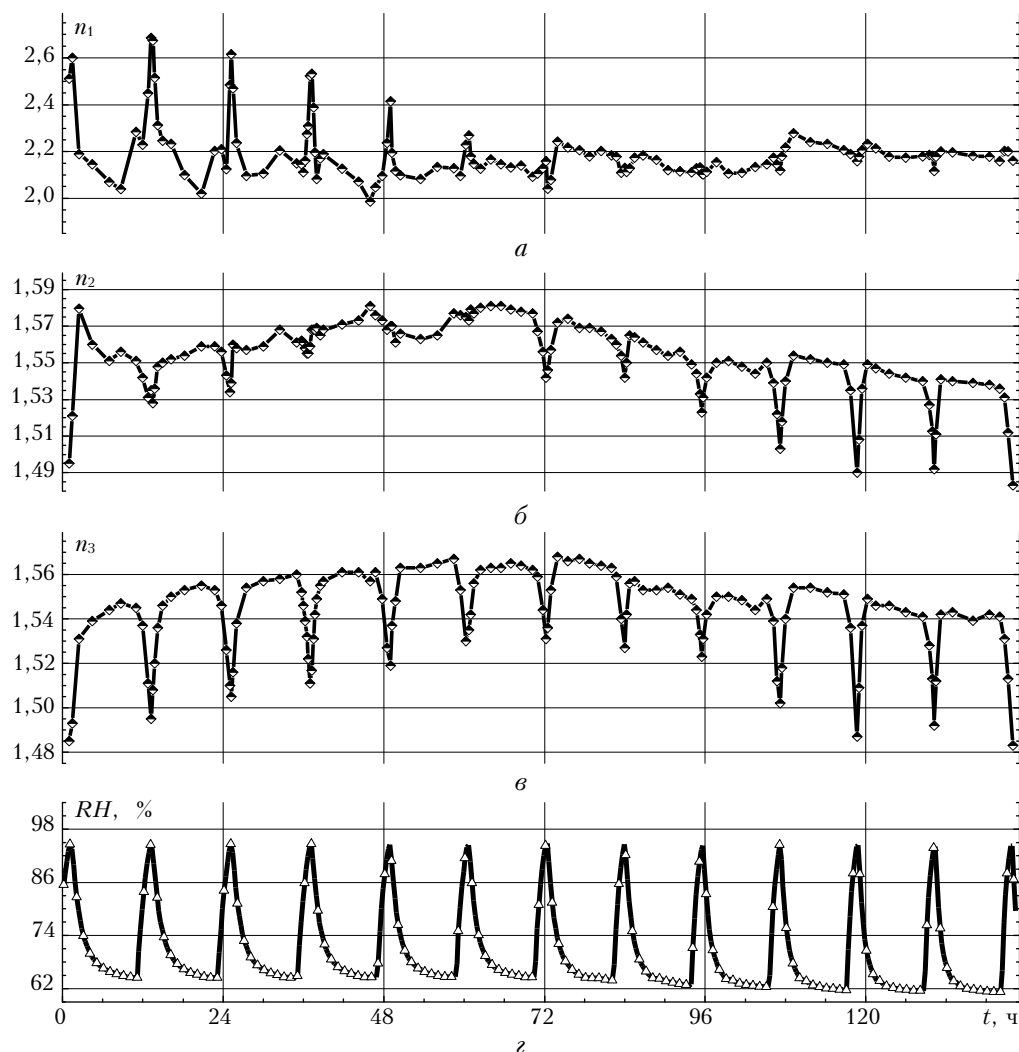


Рис. 9. Изменчивость реальной части КПП m для: тонкодисперсной фракции частиц с $30 < r < 95$ нм (а); среднелдисперсной фракции с $100 < r < 210$ нм (б); крупных частиц с $r > 200$ нм (в). Динамика относительной влажности (г)

Заклучение

Анализ результатов дымового эксперимента, выполненного в условиях контролируемой переменной влажности воздуха, в очередной раз подтверждает высказанный Г.В. Розенбергом в 1970-х гг. тезис [14] о том, что изменчивость свойств частиц атмосферного аэрозоля, особенно в приземном слое, практически всегда представляет собой непрерывно развивающийся процесс. В настоящей работе с помощью измерений аэрозольного светорассеяния на основе метода поляризационной спектрофелометрии и решения обратной задачи подробно проанализированы особенности отклика дисперсного состава и оптических постоянных частиц смешанного дыма, генерируемого в ходе лесных пожаров при горении биомассы, на периодические циклические воздействия относительной влажности воздуха в условиях длительного старения дымовой среды. Результаты показали, что при долговременной эволюции дымового аэрозоля трансформация

его оптико-микрофизических характеристик во все периоды времени — от момента образования дыма до поздних стадий его долгого старения в атмосфере — определяется одновременным воздействием («интерференцией») процессов коагуляционной и конденсационной изменчивости частиц. Эти два физических процесса тесно взаимосвязаны, и их влияние на состав аэрозоля усложняет общую картину динамики его поглощающих и конденсационных свойств.

Показана важная роль фактора физико-химической разнородности состава отдельных фракций частиц в динамике дымового аэрозоля, образующегося при смешении дымов низкотемпературного тления и открытого пламенного горения лесных горючих материалов. Воздействие этого фактора проявляется, в первую очередь, в различии значений показателей преломления и поглощения вещества частиц для разных фракций; оно многократно усиливается по мере накопления в дымовой среде высоких концентраций частиц тонкодисперсной поглощающей сажевой фракции.

Тесное взаимодействие факторов физико-химической разнородности состава дыма и конденсационной динамики частиц приводит к тому, что оптико-микрофизические характеристики смешанного дыма обнаруживают сильные качественные и количественные изменчивости влажностного отклика дымовой среды на начальной (0–2-е сут), средней (2–4-е сут) и заключительной (4–6-е сут) стадиях старения дыма, существенно разные для трех фракций частиц.

На начальной стадии в условиях высоких концентраций тонкодисперсной сажи (менее 100 нм) рост влажности стимулирует сильную коагуляционную миграцию сажи в более крупный диапазон размеров, что в итоге приводит к росту эффективного радиуса частиц и альбедо однократного рассеяния. Однако характер влажностного воздействия на показатели поглощения и преломления вещества частиц качественно и количественно меняется на различных стадиях старения дыма в зависимости от дисперсного состава фракции. Так, для тонкодисперсной фракции частиц рост влажности на первых двух стадиях эволюции (0–4-е сут) приводит к увеличению показателей поглощения и преломления, что можно объяснить лишь влажностной стимуляцией поступления микродисперсной сажи в оптически активный диапазон размеров. Для среднелдисперсных (на стадиях более 2 сут) и крупнодисперсных (в течение всего периода старения) преобладающим механизмом изменения структуры становится их конденсационное обводнение, приводящее к росту размеров и уменьшению значений показателей преломления и поглощения частиц.

По результатам обращения больших массивов нефелометрических измерений успешно апробирована методика пофракционной оценки значений КПП для частиц смешанного дыма. Установлено, что для достижения приемлемой величины невязки 5–10% между восстановленными и измеренными значениями спектральных коэффициентов углового рассеяния необходимо учитывать в дисперсном составе частиц, наряду с сильнопоглощающей тонкодисперсной фракцией, отдельно средне- и крупнодисперсную фракции умеренно поглощающих частиц.

Для среднелдисперсной фракции на начальной стадии эволюции дыма величина показателя поглощения примерно вдвое превышает значение этого параметра для крупных частиц. Учет в составе дыма среднелдисперсной и крупнодисперсной фракций и различий значений действительной и мнимой частей КПП для них позволяет резко уменьшить невязку при решении обратной задачи на 30–45% (иногда в 2 раза).

Следует отметить, что пофракционное деление дымовой смеси по указанным интервалам изменчивости значений КПП дает возможность оценить эффективные значения показателей преломления и поглощения в пределах соответствующих интервалов размеров аэрозольных частиц. Полученные оценки КПП характеризуют изменчивость диэлектрических свойств материала аэрозольных частиц как средние для данного интервала значения.

Поскольку оптический вклад поглощающих тонкодисперсных частиц $r < 100$ нм значительно уступает вкладу средне- и крупнодисперсных частиц, то на стадии поиска значений КПП для всех фракций потребовалось увеличить число итераций для достижения более высокой точности оценки КПП умеренно поглощающих частиц смешанного дыма.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №15-05-01983.

1. *Георгиевский Ю.С., Розенберг Г.В.* Влажность как фактор изменчивости аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. океана. 1973. Т. 9, № 2. С. 126–137.
2. *Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Terpugova S.A., Kozlov V.S.* Active spectral nephelometry as a method for the study of submicron atmospheric aerosols // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, N 9. P. 2567–2583.
3. *Панченко М.В.* Относительная влажность воздуха и поглощение ИК-излучения субмикронным аэрозолем // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1, № 4. С. 25–29.
4. *Горчаков Г.И., Сидоров В.Н., Свириденков М.А.* О конденсационной активности фонового аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. океана. 1982. Т. 18, № 9. С. 997–999.
5. *Белан Б.Д., Панченко М.В., Рассказчикова Т.М., Толмачев Г.Н., Задде Г.О.* К вопросу о трансформации спектра размеров частиц аэрозоля при изменении влажности воздуха // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2, № 8. С. 800–805.
6. *Кондратьев К.Я., Исидоров В.А.* Глобальный круговорот углерода // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14, № 2. С. 89–105.
7. *Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А.* Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 279–292.
8. *Виноградова А.А.* Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1059–1065; *Vinogradova A.A.* Anthropogenic Black Carbon emissions to the atmosphere: Surface distribution through Russian territory // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 2. P. 158–164.
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. *Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P.* Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5722–5741.
11. *Томшин О.А., Соловьев В.С.* Исследование вариаций характеристик атмосферного аэрозоля, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Центральной Якутии (2002 г.) // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 634–639; *Tomshin O.A., Solov'yev V.S.* Study of variations in parameters of atmospheric aerosol due to large-scale forest fires in Central Yakutia (2002) // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 95–99.
12. *Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А.* Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 512–520; *Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A.*

- Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of Black Carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 566–574.
13. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля // *Физика атмосферы и проблемы климата*. М.: Наука, 1980. С. 216–257.
 14. Розенберг Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетически обусловленные параметры // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. океана*. 1983. Т. 19, N 1. С. 21–35.
 15. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Дистанционное зондирование глобальной пространственно-временной изменчивости аэрозоля и его воздействия на климат // *Оптика атмосф. и океана*. 2004. Т. 17, № 1. С. 25–35.
 16. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Bernsten T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher 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., Storelmo 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, N 11. P. 5380–5552.
 17. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Terpuogova S.A., Polkin V.V., Kozlov V.S. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 7. P. 1513–1527.
 18. 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; *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. 259–267.
 19. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Вариации оптических постоянных и спектра размеров дымовых аэрозолей, образованных при термическом разложении разносортных древесных материалов // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 4. С. 248–258; *Rakhimov R.F., Makienko E.V., Shmargunov V.P.* Variations of the optical constants and size spectra of smoke aerosols produced during the thermal decomposition of different types of wooden materials // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 5. P. 364–374.
 20. 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; *Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Shmargunov V.P.* On time dynamics of the complex refractive index and particle microstructure according to data of spectronephelometer measurements in mixed-composition smokes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 1. P. 51–61.
 21. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // *Adv. Geophys.* 1976. V. 19. P. 73–188.

V.S. Kozlov, R.F. Rakhimov, V.P. Shmargunov. Variability of condensation properties of the mixed smoke from biomass burning at different stages of its evolution.

The variability of the optical-microphysical properties of the mixed wood smoke is studied in the Large Aerosol Chamber of IAO SB RAS (volume 1800 m³) during smoke aging for six days with periodic changes in the relative humidity of air within the range 45–95%. The dynamics of the size distributions and complex refractive indices for the ultrafine, fine, and coarse particles, their effective radii, lidar scattering parameter, and the single scattering albedo in the visible are analyzed on the basis of the results of detailed nephelometric measurements of the angular scattering coefficients and solution of the inverse problem. It is found that both quantitative and qualitative features of the variations in the optical-microphysical parameters vary significantly with the air humidity at different stages of the smoke aging. The key factors of the mixed smoke variability are the physical-chemical heterogeneity of three fractions of smoke particles and physical processes, such as migration of ultrafine BC particles (< 100 nm) in the size spectrum due to coagulation and the condensation growth of smoke particles. Interconnected effects (interference) of the mentioned processes on the particle's structure determine the main features of the dynamics of the composition and absorbing properties of the smoke particles.