

Э.В. Макиенко, Д.М. Кабанов, Р.Ф. Рахимов, С.М. Сакерин

Изменения микроструктуры аэрозоля под воздействием дымов по результатам обращения данных спектральных оптических измерений

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.10.2006 г.

Анализируются результаты измерений спектральной аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, полученные в 1999, 2003 и 2004 гг. в периоды, когда наблюдалось существенное увеличение мутности атмосферы под воздействием дымов лесных пожаров вблизи Томска и поступающих путем дальнего переноса воздушных масс. Измерения спектральной прозрачности атмосферы осуществлялись с помощью многоволнового солнечного фотометра в интервале длин волн 0,35–4,0 мкм. Рассматриваются динамика среднедневных значений АОТ при сохранении в атмосфере дыма в течение нескольких дней и соответствующая трансформация микроструктуры аэрозоля по результатам решения обратной задачи.

Введение

Изучение механизмов генерации и распространения дымовых аэрозолей в результате лесных пожаров и горения торфяников крайне важно для анализа специфики формирования оптического состояния атмосферы над регионами Сибири. Особенно актуально исследование данной проблемы для оценки приоритетной значимости различных факторов, определяющих изменение оптической прозрачности атмосферы в летние сезоны, когда интенсивность таких событий резко возрастает. В результате лесных пожаров выделяется значительное количество аэрозолей и тепла, активизируются процессы термической возгонки летучих соединений, существенно увеличивается эмиссия аэрозолеобразующих газов (АОГ) из древесины.

Отличительной особенностью дымов, выбрасываемых в атмосферу очагами масштабных возгораний биомассы, является высокая концентрация дисперсной смеси аэрозольных частиц и АОГ. Содержание дисперсной компоненты в дымовых выбросах на порядки превосходит ее обычный уровень. Время релаксации этих неоднородностей к равновесному состоянию, как и динамика изменения оптико-микрофизических параметров аэрозолей, варьирует в зависимости от типа воздушных масс (ВМ).

Вертикальный сдвиг скорости ветра в тропосферном слое и турбулентное перемешивание, как правило, разрывают дымовые потоки в составе ВМ на пространственно-неоднородные ячейки. Дисперсный состав дымов в этих ячейках испытывает несинхронные изменения. Горизонтальные перемещения дымовых аномалий фиксируются аппаратурой как значительные колебания параметров аэрозольного светорассеяния (ПАС). Поэтому для дымов в атмосфере трудно указать какое-либо характерное (типичное) состояние.

В связи с неустойчивостью режимов термической генерации дымов параметры дисперсной смеси (в том числе и показатель преломления частиц) варьируют в широком интервале значений, что предопределяет особое внимание к лабораторным исследованиям их изменчивости в контролируемых условиях аэрозольных камер [1–5]. С другой стороны, состояние дымов зависит не только от условий их генерации (в процессе горения или пиролиза), но и от факторов, регулирующих специфику их распространения в условиях атмосферы и эффективности стока, т.е. от конкретных метеоусловий в эпизодах натуральных наблюдений. Отдельные циклы дымовых исследований проводились в ИФА РАН (г. Москва) [6, 7], ИОА СО РАН (г. Томск) [8, 9] и в других организациях. Однако некоторые аспекты проблемы по-прежнему продолжают оставаться недостаточно изученными. В частности, необходимы экспериментальные данные, которые позволили бы определить характерную, взаимную (среднестатистическую) изменчивость оптических и микрофизических характеристик дымовых аэрозолей.

Цель нашей работы заключалась в исследовании факторов, определяющих специфику возмущения оптического состояния тропосферной дымки, при интенсивных выносах дымовых аэрозолей в атмосферу от различных крупномасштабных очагов возгораний. При этом главное внимание было уделено изучению особенностей развития дисперсного состава аэрозольной фазы на разных стадиях рассеяния дымов в атмосфере, в частности дымов местного формирования и дальнего переноса, определяющих изменение спектральной прозрачности атмосферы.

Методика исследования

Анализ оптико-микрофизических свойств различных типов дымовых аэрозолей проводился по данным

спектральных измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) в 1999, 2003 и 2004 гг. в периоды, когда наблюдалось существенное увеличение мутности атмосферы под воздействием дымов лесных пожаров вблизи г. Томска и поступающих путем дальнего переноса воздушных масс. Измерения спектральной прозрачности атмосферы осуществлялись с помощью многоволнового солнечного фотометра в интервале длин волн 0,35–4,0 мкм. Наблюдения проводились короткими сериями продолжительностью ~5–30 мин, когда Солнце не было закрыто облаками. Из полученных данных рассчитывались среднечасовые значения. Методики калибровки фотометра и определения АОТ атмосферы рассмотрены в работах [10, 11]. Одновременно с аэрозольной компонентой солнечным фотометром измерялось общее влагосодержание атмосферы W .

Изменчивость характеристик микроструктуры аэрозоля анализировалась по результатам решения обратной задачи с помощью регуляризирующего алгоритма, основанного на построении сглаживающего функционала по методу А.Н. Тихонова [12] и прямой минимизации его в k -мерном векторном пространстве. Особенности методики обращения подробно рассмотрены в [13].

Комплексный показатель преломления частиц выбирался с учетом результатов исследования дымов в контролируемых условиях аэрозольной камеры [3] по данным спектрофелометрических измерений поляризационных компонент коэффициента направленного светорассеяния на пяти фиксированных углах $\theta = 15, 45, 110, 135, 165^\circ$ в спектральном диапазоне $\lambda = 0,44 \pm 0,69$ мкм. Полученные в [3] оценки вещественной части показателя преломления при пиролизе хвойных образцов древесины находились в интервале значений 1,45–1,54, мнимой части составляли менее 0,005, а их изменения оказались согласованными с уровнем абсолютной влажности.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показана изменчивость АОТ в двух участках спектра в июле – августе 1999 г. в районе г. Томска, когда дважды наблюдалось существенное увеличение замутнения атмосферы, связанное с пожарами.

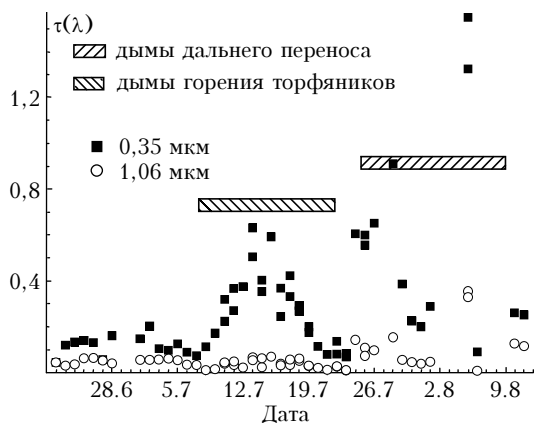


Рис. 1. Временная динамика АОТ атмосферы в июле – августе 1999 г. в двух участках спектра

Среднедневные спектральные зависимости АОТ в различных оптических условиях приведены на рис. 2.

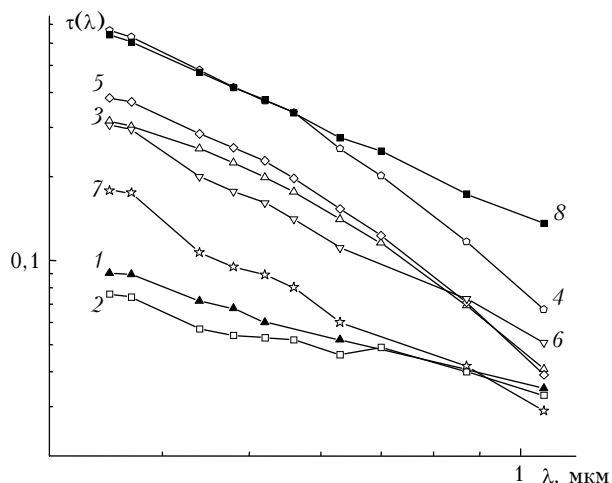


Рис. 2. Трансформация спектров АОТ атмосферы в период пожаров: 1, 2 – до дыма (6, 7 июля 1999 г.); 3–7 – в местных дымах (горение торфяников в окрестности г. Томска, 9–19 июля); 8 – в дымах дальнего переноса (лесные пожары в Красноярском крае, 24 июля)

В первой ситуации (9–19 июля) уменьшение прозрачности было связано с горением торфяников, расположенных на расстоянии 10–20 км. Вторичное повышение мутности атмосферы с 24 июля по первую декаду августа было связано с дальним переносом дымового аэрозоля от лесных пожаров в Красноярском крае. Из оптических данных следует (см. рис. 1, 2), что в обоих случаях (горение торфяников и лесные пожары) общим является существенное увеличение (примерно в 4 раза) аэрозольного замутнения в коротковолновой области спектра. Основные особенности трансформации микроструктуры аэрозоля под воздействием дымов видны из распределений объемов частиц (рис. 3), восстановленных по данным рис. 2.

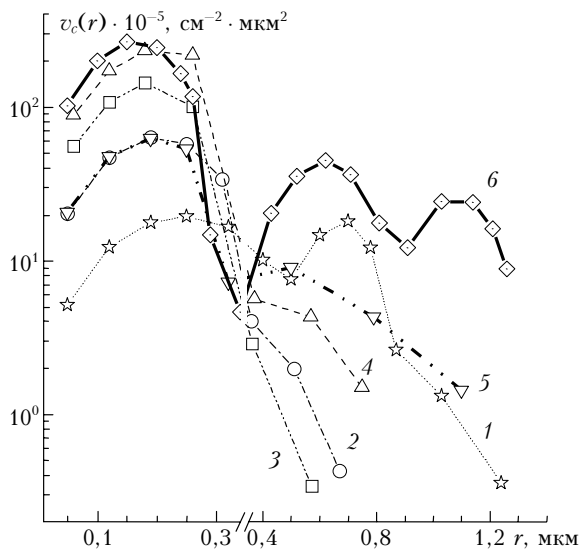


Рис. 3. Характерные особенности распределения объемов частиц по размерам в столбе атмосферы: 1 – до дыма (7 июля 1999 г.); 2–5 – в местных дымах (горение торфяников в окрестности г. Томска, 9–19 июля); 6 – в дымах дальнего переноса (лесные пожары в Красноярском крае, 24 июля)

Концентрация частиц аэрозоля в области размеров аккумулятивной фракции ($r \sim 0,05 \div 0,35$ мкм) с модой объемного распределения $r_{mod} = 0,2$ мкм увеличилась в условиях дыма более чем на порядок. Вместе с тем в дымовых ситуациях с разной предысторией есть особенности.

С появлением в атмосфере дыма от близко расположенных источников (тление торфяников) одновременно с ростом концентрации мелких частиц резко снизилось содержание крупных частиц радиусами более 0,4 мкм. В то же время результаты обращения спектральных зависимостей коэффициентов аэрозольного ослабления на горизонтальной трассе обнаруживают повышенное содержание средне- и грубодисперсных аэрозолей [9]. В этих условиях спектральная зависимость АОТ в пределах точности оптических измерений определялась частицами аккумулятивной фракции.

По мере ослабления источника дымовых аэрозолей и увеличения прозрачности содержание частиц $r > 0,4$ мкм постепенно возрастает и 18–19 июля приближается к уровню, наблюдавшемуся до начала пожара. Недостаток информации не позволяет однозначно связать ситуацию горения торфяников с дефицитом крупных частиц. Среди возможных причин эффекта можно предположить ослабление процессов конвекции и турбулентности (выноса частиц) при уменьшении радиационного прогрева подстилающей поверхности, смену воздушной массы и слабый ветер в период горения торфяников. Кривые 1, 2 на рис. 2 показывают, что смена континентально-умеренной воздушной массы на субтропическую в ночь с 6 на 7 июля не привела к существенному изменению среднедневных спектральных зависимостей АОТ. Пиковые значения скорости приземного ветра в период наблюдений не превышали 5 м/с.

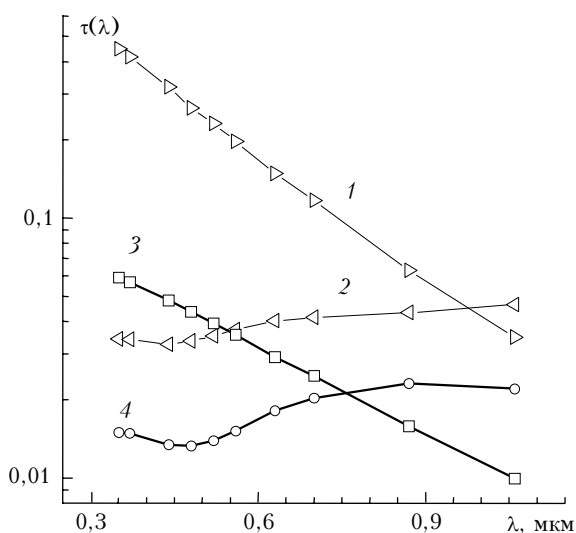


Рис. 4. Оптические вклады в АОТ частиц аккумулятивной и среднелдисперсной фракций в дымах дальнего переноса от лесных пожаров в Красноярском крае (кривые 1, 2 – 25.07.99) и в условиях до дыма (3, 4 – 07.07.99)

В ситуации дальнего переноса дыма от лесных пожаров в Красноярском крае наблюдалось повышение концентрации частиц в области размеров 0,4–1,1 мкм.

Суммарный объем этих частиц оказался в 2–3 раза выше, чем в условиях чистой атмосферы.

Оптический вклад среднелдисперсных частиц ($r > 0,4$ мкм) составляет около 15% на длине волны 0,48 мкм и возрастает до 50% в ИК-диапазоне (рис. 4, кривые 1, 2).

Еще одна особенность проявилась в дневной динамике среднелдисперсной фракции в столбе атмосферы. Спектр размеров частиц этой фракции варьирует в течение дня относительно некоторых средних значений и не имеет того хорошо выраженного дневного хода с максимумом в полдень, который наблюдался в незадымленной атмосфере (рис. 5).

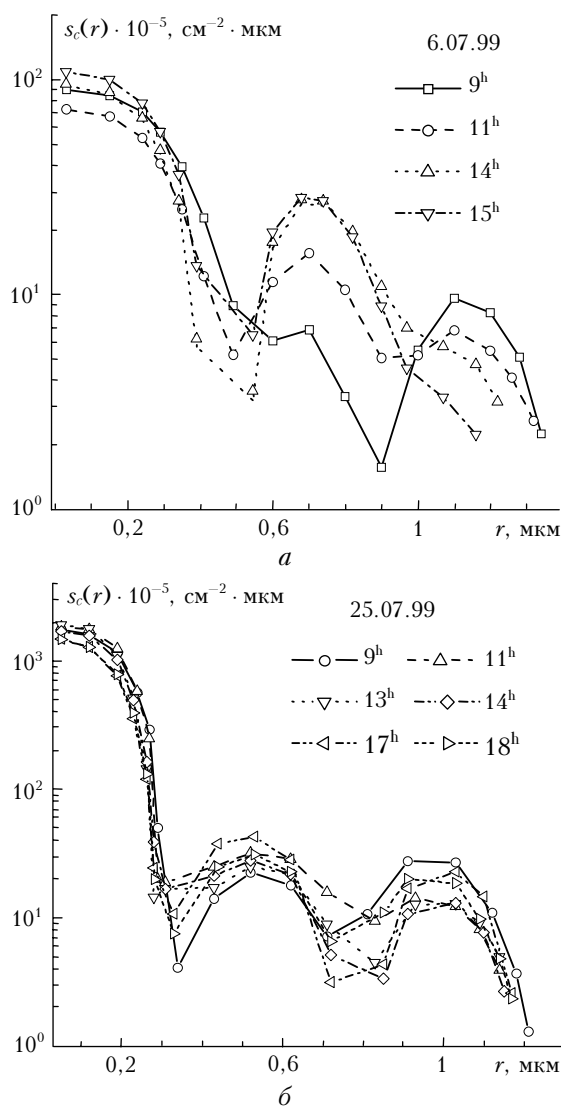


Рис. 5. Дневная изменчивость распределений геометрического сечения частиц по размерам в условиях до дыма (а) и при наличии в атмосфере дыма дальнего переноса (б)

Можно предположить, что внутриагмосферная трансформация аккумулятивной фракции дымового аэрозоля (постепенное укрупнение и частично переход в область размеров $r > 0,4$ мкм) является одним из факторов пополнения среднелдисперсного аэрозоля.

Отмеченные закономерности изменения оптико-микроструктурных характеристик аэрозоля под воздействием дымов наблюдались и в летние сезоны 2003–2004 гг. Соответствующие примеры показаны на рис. 6, 7.

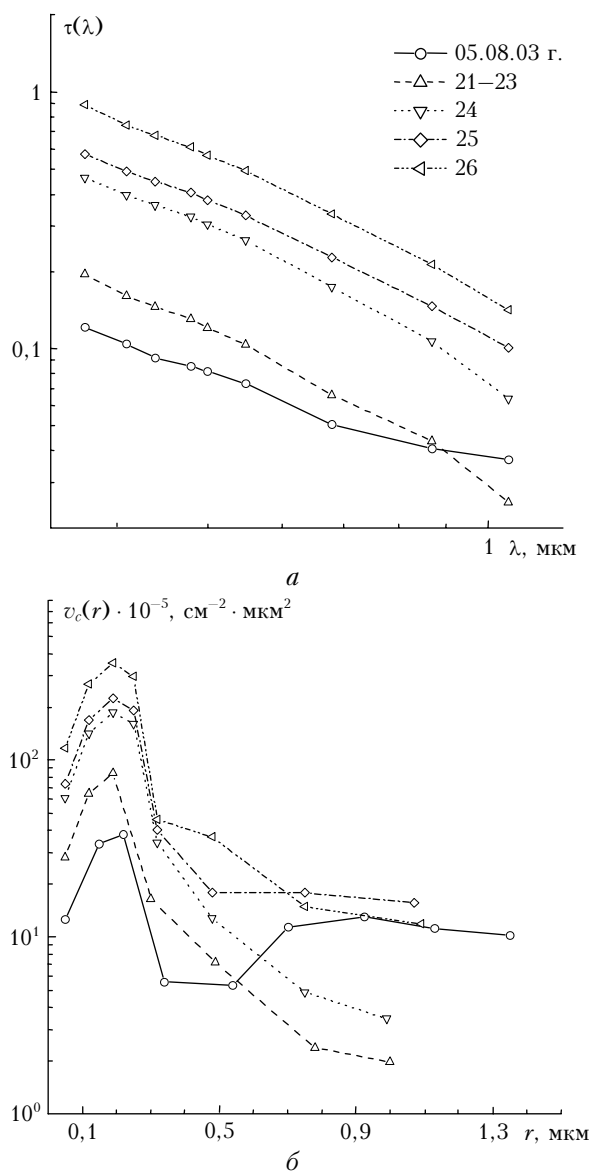


Рис. 6. Измеренные спектральные зависимости АОТ (*a*) и восстановленные распределения объемов частиц (*б*) в условиях высокой прозрачности (5 августа 2003 г.) и в дымовой ситуации (21–26 августа 2003 г.)

Представленные на рис. 6 временные изменения $\tau(\lambda)$ и восстановленные распределения $v_c(r)$ происходят в стабильной безоблачной атмосфере в условиях арктической воздушной массы, длительное время находившейся над континентом в умеренных широтах. С поступлением 21 августа дыма (рис. 6, *a*) микроструктура аэрозоля изменяется аналогично представленной на рис. 3 в период горения торфяников вблизи Томска. Суммарный объем частиц аккумулятивной фракции в столбе атмосферы V_c в интервале $r < 0,4$ мкм возрос с $8 \cdot 10^5$ до $16 \cdot 10^5$ см⁻² · мкм³.

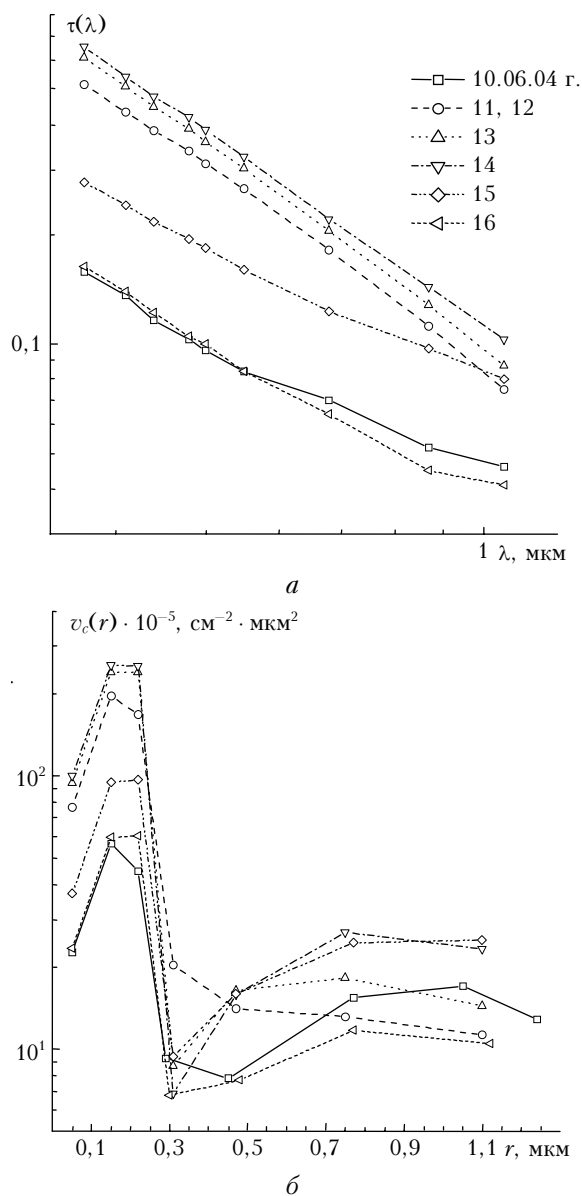


Рис. 7. Измеренные спектральные зависимости АОТ (*a*) и восстановленные распределения объемов частиц (*б*) в условиях высокой прозрачности (10 июня 2004 г.), при наблюдении в атмосфере дымов (11–15 июня) и после смены воздушной массы (16 июня)

Суммарный объем более крупных частиц в диапазоне дисперсности $0,4 < r < 1,0$ мкм резко снизился с $11 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^5$ см⁻² · мкм³. Бимодальное распределение частиц по размерам, восстановленное по данным измерений АОТ в условиях высокой прозрачности атмосферы до поступления дыма, трансформировалось в одномодальное (рис. 6, *б*), которое можно рассматривать как одну фракцию преимущественно мелкодисперсного дыма. Средний размер частиц, найденный по соотношению $r_m = 0,75 V_c / S_c$, где S_c — суммарное сечение частиц в столбе атмосферы, равен 0,15 мкм. Вследствие понижения относительного оптического вклада в АОТ крупных частиц, спектральная зависимость $\tau(\lambda)$ в начальный период регистрации дыма становится выпуклой вверх

в двойном логарифмическом масштабе. По среднедневным данным 21, 22 и 23 августа измеренные величины АОТ и соответственно восстановленные параметры микроструктуры аэрозоля существенно не меняются. С 24 августа значительно усиливается интенсивность поступления дыма, суммарный объем частиц $r < 0,4$ мкм возрастает до $40 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ 24 августа и достигает $73 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ 26 августа. В этот период существенно увеличиваются суммарные объемы частиц среднедисперсного аэрозоля. Средний размер частиц 25 и 26 августа возрастает до 0,17–0,18 мкм. С повышением концентрации среднедисперсных частиц трансформируется спектральная зависимость $\tau(\lambda)$, которая в двойном логарифмическом масштабе приближается к линейной. Смена воздушной массы 28 августа приводит к значительному увеличению прозрачности атмосферы. Суммарный объем частиц $r < 0,4$ мкм уменьшается до $21 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$. Однако дымовая ситуация быстро возобновляется, что указывает на близость источника дыма к пункту наблюдений. Измеренные значения АОТ в ультрафиолетовом диапазоне возрастают 29–30 августа до 0,5–0,6, оценки суммарного объема частиц $r < 0,4$ мкм находятся на уровне $35\text{--}40 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$.

Другая ситуация показана на рис. 7. В этом случае дымовая аэрозоль поступил в атмосферу над Томском в составе сменявшейся в ночь с 10 на 11 июня воздушной массы. Измеренные величины АОТ

в ультрафиолетовой части спектра возросли с приходом новой воздушной массы до 0,55, суммарный объем частиц $V_c(r < 0,4 \text{ мкм})$ увеличился практически в 4 раза с $11 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ 10 июня до $40 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ 11 июня. На уровне высокой концентрации мелкодисперсного аэрозоля его межсуточные изменения в период с 11 по 14 июня не так существенны. Максимальные оценки значений $V_c(r < 0,4 \text{ мкм})$ $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ получены по данным за 14 июня.

Более выражена межсуточная динамика среднедисперсного аэрозоля (рис. 7, б), которая проявляется в последовательном возрастании $V_c(r > 0,4 \text{ мкм})$ с $10 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ 11 июня до $18 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$ 14 июня. Затем, 15 июня, прозрачность атмосферы значительно повышается (рис. 7, а). При этом величина $V_c(r < 0,4 \text{ мкм})$ соответственно снизилась с $50 \cdot 10^5$ до $20 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$, однако суммарный объем частиц среднедисперсного аэрозоля остался на достигнутом 14 июня уровне. Смена воздушной массы 16 июня практически полностью восстанавливает ситуацию, наблюдавшуюся до поступления дыма.

В заключение приведем некоторые результаты восстановления спектра размеров частиц в целом по массиву данных за летние периоды 2003–2004 гг., когда повторяемость дымовых ситуаций была наиболее высокой (рис. 8). Диапазон измеренных величин АОТ (на длине волны 0,48 мкм) был разбит на 5 уровней: 0,03–0,059; 0,059–0,116; 0,116–0,228;

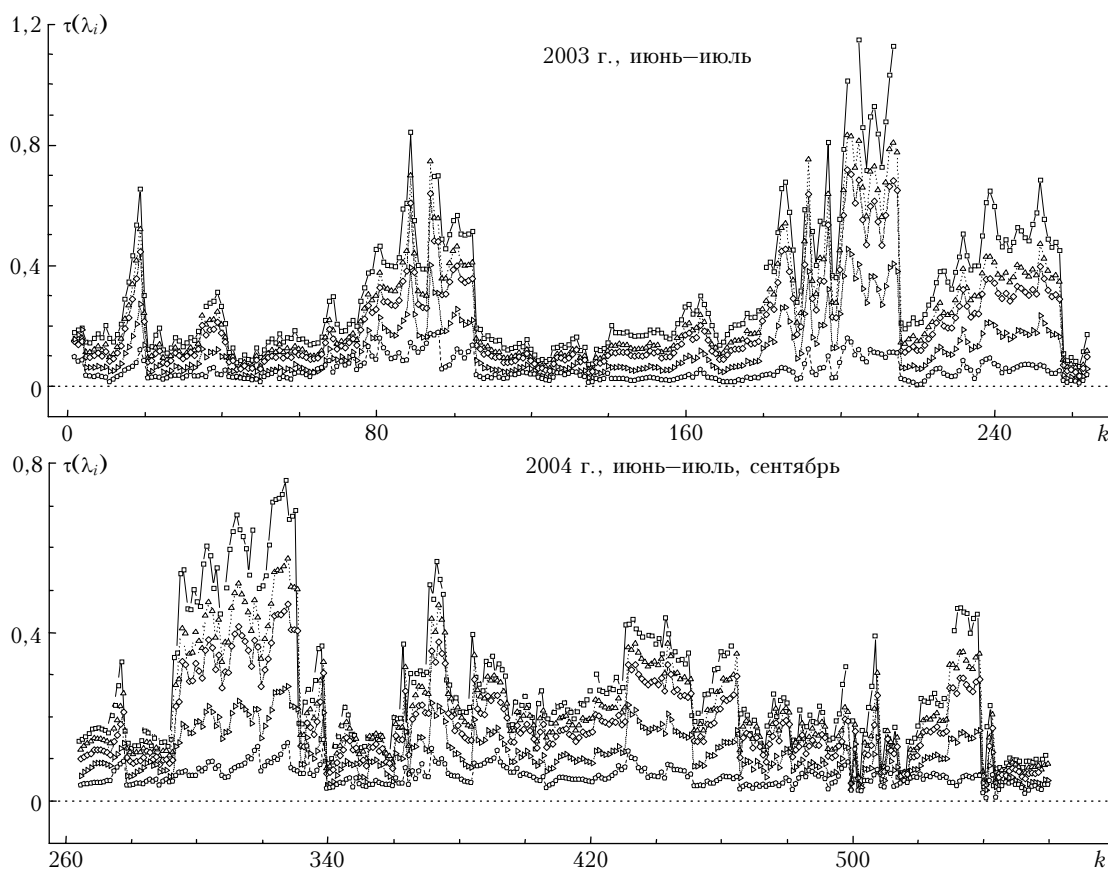


Рис. 8. Временная изменчивость АОТ, измеренных в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм, в летние сезоны 2003 и 2004 гг. (k – номер реализации)

0,228–0,448; 0,448–0,88. В качестве исходных данных при решении обратной задачи использовались средние для каждого из указанных интервалов значения $\tau(\lambda)$ в спектральном диапазоне 0,37–4 мкм (рис. 9). Нижний уровень представляет собой фоновые (минимальные для данного пункта наблюдений) значения АОТ, второй и третий уровни достаточно типичны для летнего периода (третий уровень содержит некоторую часть дымовых ситуаций), четвертый и пятый уровни отражают преимущественно дымовые ситуации.

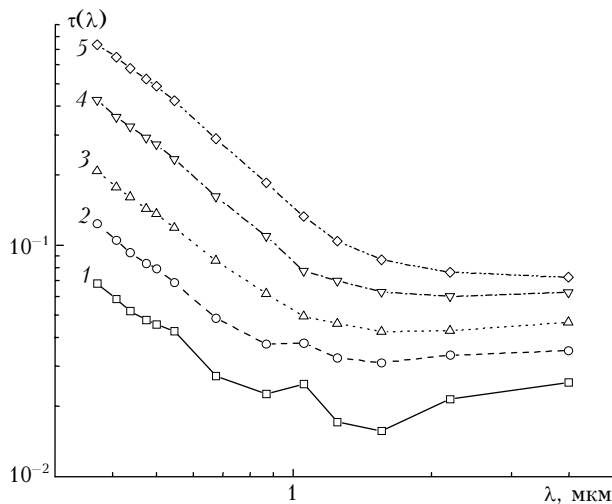


Рис. 9. Средние спектральные зависимости $\tau(\lambda)$ в период интенсивного воздействия дымов на атмосферу в Томске для интервалов АОТ 0,03–0,059; 0,059–0,116; 0,116–0,228; 0,228–0,448; 0,448–0,880 (кривые 1–5 соответственно)

Из рис. 10 видно, что с увеличением мутности атмосферы возрастает заполнение аэрозолями среднелдисперсного диапазона размеров частиц.

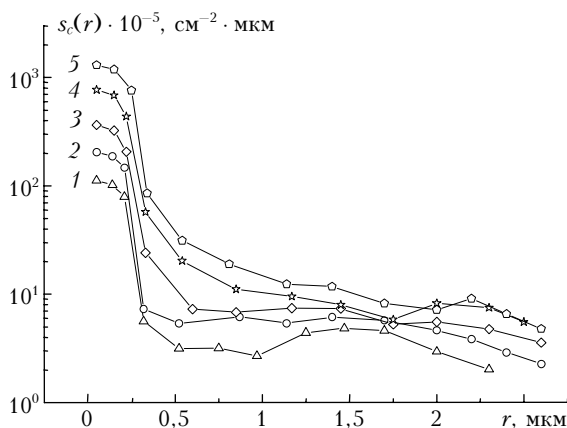


Рис. 10. Распределения геометрического сечения частиц по размерам в столбе атмосферы, восстановленные по оптическим данным, представленным на рис. 9

Граница первой субмикронной моды все более смещается вправо от 0,4 мкм в первом и втором уровнях АОТ до 0,8 в четвертом уровне и превышает 1 мкм в пятом уровне выбранной градации прозрачности атмосферы.

Выводы

1. В наблюдавшихся местных дымах горения торфяников и леса в начальный период их регистрации объемная концентрация частиц размерами $r > 0,5$ мкм находилась на уровне пренебрежимо малых значений. В дымах дальнего переноса от лесных пожаров концентрация частиц этого диапазона в большинстве реализаций превышала уровень среднесуточных значений в незадымленной атмосфере.

2. Отсутствие дневного хода крупных частиц в замутненной атмосфере, по-видимому, связано с ослаблением процессов конвекции и турбулентности (выноса частиц) при уменьшении радиационного прогрева подстилающей поверхности в присутствии дымов.

3. Внутриагосферная трансформация мелкодисперсной фракции дымового аэрозоля (постепенное укрупнение и переход в область размеров $r > 0,4$ мкм) является одним из факторов пополнения среднелдисперсного аэрозоля.

4. С увеличением концентрации мелкодисперсного дымового аэрозоля, по усредненным данным за летние периоды 2003–2004 гг., возрастает интенсивность заполнения среднелдисперсного диапазона размеров частиц. Граница первой субмикронной моды смещается вправо в зависимости от плотности дыма и при сильных замутнениях ($\tau(\lambda) > 0,5$) достигает 1 мкм.

Авторы выражают благодарность Б.Д. Белану, Т.М. Рассказчиковой за предоставленные данные о синоптической ситуации, С.В. Афонину за информацию о поступлении в Томск дымов лесных пожаров в июле 1999 г. по данным спутниковых наблюдений.

Работа выполнена по программе Президиума РАН, проект «ОНЗ-11», и при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-05-64842).

1. Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г. О влиянии режима сжигания углеводородных топлив на оптические свойства дымовых аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1278–1286.
2. Козлов В.С., Панченко М.В. Исследование оптических свойств и дисперсного состава древесных дымовых аэрозолей // Физ. горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 5. С. 122–133.
3. 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.
4. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Оптико-микрофизические свойства пролизных дымов по данным поляризационной нефелометрии // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 328–336.
5. Исаков А.А. Некоторые результаты исследований оптических и микрофизических характеристик дымов // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 23–30.
6. Исаков А.А. Оптические и микрофизические характеристики дымов лесных пожаров в Подмоскowie в июле–сентябре 2002 г. // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 886–892.
7. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я.,

- Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А.* Исследование состава задымленной атмосферы Москвы во время пожаров торфяников летом осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 366–380.
8. *Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н., Якушева Е.П.* Исследование особенностей динамики оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в дымовой мгле // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 406–410.
9. *Makienko E.V., Rakhimov R.F., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Uzhegov V.N.* Investigation of the forest fire smoke aerosol microstructure by the methods of spectral transparency // Proc. of the 5th Int. Conf. «Wildlife Fires: Initiation, Spread, Suppressing and Ecological Consequences». Krasnojarsk. June 30 – July 5, 2003. P. 285–287.
10. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 866–874.
11. *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Spatial Inhomogeneities and the spectral behavior of atmospheric aerosol optical depth over Atlantic ocean // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 3. Part 1. P. 484–500.
12. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных обратных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
13. *Zuev V.E., Naats I.E.* Inverse problem of lidar sensing of the atmosphere. Springer-Verlag, 1983. 260 p.

E.V. Makienko, D.M. Kabanov, R.F. Rakhimov, S.M. Sakerin. Aerosol microstructure variation under smoke action revealed from the inversion of spectral optical measurements.

Spectral aerosol optical depth (AOD) measurements for 1999, 2003, and 2004 are under analysis. These periods were characterized by a significant increase of the atmospheric turbidity under action of forest fire smokes near Tomsk, as well as the arrival of far-transported air masses. The measurements were conducted with the multi-wave solar photometer ($\lambda = 0,35\text{--}4,0 \mu\text{m}$). The dynamics of daily averaged AOD values in conditions of the smoke presence in the atmosphere for several days, as well as the corresponding transformation of the aerosol microstructure are treated based on results of solution of the inverse problem.