

В.С. Козлов, М.В. Панченко, В.В. Польшин, Ю.А. Пхалагов,  
В.Н. Ужegov, Н.Н. Щелканов, Е.П. Яшуева

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ ОПТИЧЕСКИХ И МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ В ДЫМОВОЙ МГЛЕ

*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск*

Поступила в редакцию 18.02.99 г.

Принята к печати 11.03.99 г.

Рассматриваются результаты измерений в приземном слое воздуха спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления в области спектра 0,44–12 мкм, коэффициента аэрозольного рассеяния на длине волны 0,52 мкм, функции распределения частиц по размерам в диапазоне 0,4–10 мкм и массовой концентрации сажи в аэрозоле в период дымовой мглы, наблюдавшейся в регионе Западной Сибири в октябре 1997 г. Показано, что дымовая мгла приводит к возрастанию (до порядка величины и более) коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния в видимой области, счетной концентрации частиц и содержания сажи.

Основные изменения характеристик происходят в области мелкодисперсной фракции частиц (с размерами менее 1 мкм) и в меньшей степени для грубодисперсной. Выявлено, что дымовая мгла нивелирует особенности суточной изменчивости коэффициента рассеяния и содержания сажи, характерные для незадымленной атмосферы. Невысокое относительное содержание сажи в дымовом аэрозоле (1–4%) свидетельствует в пользу пиролизной природы частиц мглы, сформировавшихся при лесных и торфяных пожарах. Предполагается, что дымовая мгла может давать ощутимый вклад в радиационный баланс планеты.

### 1. Введение

Изучение закономерностей формирования, развития и распада плотных аэрозольных образований является актуальной задачей в области климатологии, физики и оптики атмосферы. В этом отношении значительный интерес представляет такое достаточно уникальное и слабо изученное аэрозольное образование как дымовая мгла. Учитывая большое число лесных и торфяных пожаров на Земле, есть основания полагать, что частицы дыма играют заметную роль в формировании аэрозольного состава атмосферы и, следовательно, в радиационном балансе планеты. Для изучения особенностей взаимодействия дымовой мглы с оптическим излучением представляется важным проведение комплексных исследований, включающих в себя оптические, микрофизические и метеорологические измерения.

Такие исследования были проведены в районе г. Томска во время дымовой мглы, наблюдаемой в октябре 1997 г. над обширной территорией Западной Сибири. В эксперименте выполнялись измерения спектральной прозрачности атмосферы в видимой и инфракрасной областях спектра на приземной протяженной трассе, коэффициента направленного рассеяния под углом  $45^\circ$  на длине волны 0,52 мкм, распределения счетной концентрации частиц по размерам и массовой концентрации сажи в составе аэрозоля. Измерения сопровождались наблюдениями метеопараметров атмосферы.

### 2. Описание эксперимента

Измерения коэффициента направленного рассеяния сухой основы аэрозольных частиц  $\mu_0(45^\circ)$  ( $\text{км}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$ ) и массовой концентрации сажи  $M_c$  ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) в приземном слое воздуха выполнялись круглосуточно (с периодичностью один раз в час) с помощью автоматизированной аэрозольной станции [1], работающей в режиме мониторинга. Для измерений  $\mu_0(45^\circ)$  использовался поляризационный нефелометр, оснащенный устройством для осушки воздуха в рассеивающем объеме [2]. Последующие вычисления значений коэффици-

ентов аэрозольного рассеяния сухой основы частиц  $\sigma_0$  ( $\text{км}^{-1}$ ) из измерений  $\mu_0(45^\circ)$  выполнялись на основе известного нефелометрического метода определения прозрачности, использующего близкую к линейной взаимосвязь указанных параметров. Массовая концентрация сажи определялась с помощью установки, описанной в [3], из измерений диффузного ослабления света слоем частиц непосредственно в процессе прокачки воздуха и накопления частиц на аэрозольном фильтре, аналогично [4]. Время единичного забора воздуха составляло 10 мин. Значения коэффициента рассеяния усреднялись по 600 отсчетам, а величина концентрации сажи определялась по двум отсчетам – в начале и в конце забора пробы аэрозоля. Процесс измерений на станции полностью автоматизирован и управляется персональным компьютером.

Измерения спектральной прозрачности атмосферы выполнялись на трассе длиной около 800 м на основе базового метода с помощью полностью автоматизированного двухканального аппаратного комплекса, работающего в диапазоне длин волн 0,44–12 мкм [5]. Работы велись в круглосуточном режиме с периодичностью в начальный период – шесть раз в сутки, а затем через каждые 2 ч. Для выделения аэрозольной составляющей из общего ослабления излучения в инфракрасной области спектра, где значительный вклад вносит молекулярное поглощение атмосферными газами, был применен статистический метод разделения компонент, основанный на аппарате линейного множественного регрессионного анализа [6].

Измерения распределения по размерам счетной концентрации аэрозоля проводились с помощью фотоэлектрического счетчика частиц (ФСЧ) типа АЗ-5, в двенадцати диапазонах диаметров частиц от 0,4 до 10 мкм. Для повышения точности измерений прибор снабжен пересчетным устройством (частотомер ЧЗ-63). Измерения выполнялись выборочно в светлое время суток с 7 по 10 октября. Анализируемый объем прокачиваемого воздуха для мелких частиц (до 1 мкм по диаметру) составлял 1 л, а для крупных частиц увеличивался до 3–5 л.

Рассматриваемый в настоящей работе случай дымовой мглы реализовался в районе наблюдений в условиях обширного и устойчивого антициклона, сформировавшегося над Сибирью. В Томской области в сентябре и первой декаде октября имела место достаточно редкая для этого сезона устойчивая, безветренная, теплая и сухая погода. Подобные погодные условия спровоцировали многочисленные лесные пожары и горение торфяников (наиболее интенсивные, по спутниковым данным, в Казахстане, Новосибирской, Томской областях и в Алтайском крае).

Пик развития дымовой мглы по данным наблюдений в г. Томске пришелся на первую декаду октября с наибольшей выраженностью в период 7–8 октября, когда дальность видимости в городе и его окрестностях снижалась до 2 км. Отметим, что период измерений характеризовался низкой относительной влажностью воздуха (среднее значение около 40%) и ее слабой динамикой.

### 3. Результаты оптико-микрофизических измерений

На рис. 1 приведен временной ход среднесуточных значений коэффициента аэрозольного рассеяния и массовой концентрации сажи. Из этих данных отчетливо видны стадии появления, уплотнения и распада дымовой мглы со значительной амплитудой вариаций коэффициента  $\sigma_0$  и содержания сажи в приземном слое воздуха. В первой декаде октября наблюдался устойчивый тренд постепенного накопления аэрозоля и сажи вплоть до 8 октября. При этом за сравнительно короткий временной интервал коэффициент аэрозольного рассеяния возрос в среднем в 8 раз, а содержание сажи – в 4 раза. Начиная с 9 октября смена воздушной массы привела к быстрому распаду дымовой мглы в месте наблюдений.

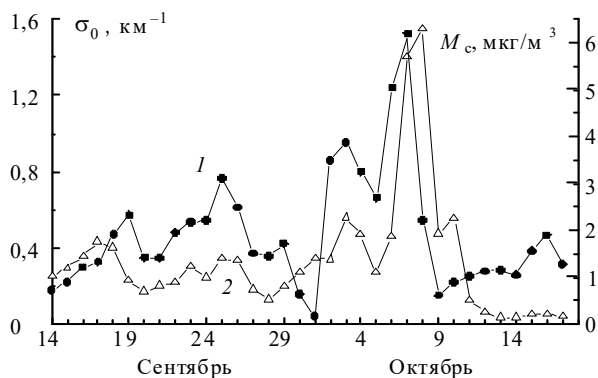


Рис. 1. Временной ход среднесуточных значений массовой концентрации сажи (1) и коэффициента аэрозольного рассеяния (2) в период формирования и распада дымовой мглы

На основе данных о коэффициенте направленного рассеяния были выполнены (в приближении применимости однопараметрической микрофизической модели аэрозоля [7]) оценки массовой концентрации мелкодисперсных частиц. В этом случае массовая концентрация ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) для частиц с плотностью  $1,8 \text{ г}/\text{см}^3$  (континентальный аэрозоль) вычислялась из выражения

$$M_a = 396 \cdot \sigma_0 = 3,56 \cdot 10^3 \cdot \mu_0(45^\circ).$$

Количественные оценки  $M_a$  по приведенной формуле показывают, что в период дымового пика 6–8 октября сред-

няя величина массовой концентрации аэрозоля достигала  $385 \text{ мкг}/\text{м}^3$ , в то время как ее «фоновое» значение (август) составляло  $31,5 \text{ мкг}/\text{м}^3$ . Соответствующие средние значения содержания сажи, полученные из измерений, составляли  $3,9$  и  $0,9 \text{ мкг}/\text{м}^3$ . В свою очередь максимальные единичные значения массовой концентрации для аэрозоля достигали  $840 \text{ мкг}/\text{м}^3$  (8 октября, в 12.00), а для сажи –  $9,7 \text{ мкг}/\text{м}^3$  (7 октября, в 14.00).

Таким образом, результаты измерений показали, что по полным пределам вариаций массовое содержание аэрозоля и сажи в дымовой мгле может превышать соответствующие величины в фоновых условиях в десять и более раз. Отметим, что массовая концентрация аэрозоля, полученная по данным микрофизических измерений ФСЧ, составила около  $300 \text{ мкг}/\text{м}^3$ , что согласуется с приведенной выше оценкой для  $M_a$ , выполненной по данным измерений коэффициента направленного рассеяния.

Особенности динамики аэрозольного ослабления излучения в разных участках спектра во время дымовой мглы иллюстрируют рис. 2 и 3. На рис. 2 приведен временной ход коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  для нескольких длин волн в период с 6 по 10 октября (разрыв кривых на рисунке связан с возникшими неисправностями аппаратуры).

Из рисунка следует, что максимальные изменения коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в дымовой мгле наблюдаются в видимом диапазоне длин волн. Об этом же свидетельствуют и данные рис. 3. Видно, что при появлении мглы интенсивно растут коэффициенты  $\alpha(\lambda)$  в коротковолновой части спектра, в то время как в ИК-области длин волн уровень ослабления практически не изменяется (даже отмечается некоторое уменьшение коэффициентов ослабления). Это свидетельствует о том, что уплотнение мглы в начальный период идет за счет роста концентрации субмикронной фракции частиц.

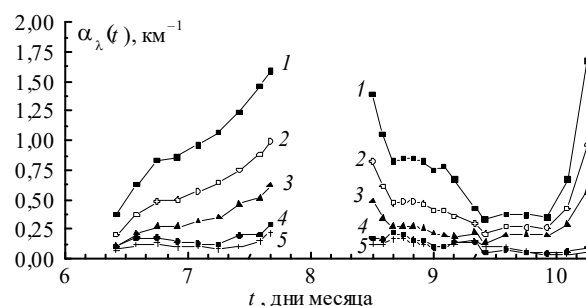


Рис. 2. Временной ход коэффициентов аэрозольного ослабления для длин волн: 0,44 мкм (кривая 1); 0,56 мкм (2); 0,87 мкм (3); 1,60 мкм (4) и 10,6 мкм (5)

Вместе с тем при дальнейшем уплотнении мглы (7 октября в 16.00) отмечается заметное увеличение уровня аэрозольного ослабления не только в видимом, но и в ИК-диапазоне длин волн (см. рис. 3,б). Нейтральный по спектру характер аэрозольного ослабления в ИК-области позволяет предположить, что он, возможно, связан с дневным выносом почвенного аэрозоля в приземный слой атмосферы. При распаде мглы (см. рис. 3,в) значительное уменьшение коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  имеет место только в коротковолновой области спектра ( $\lambda \leq 1 \text{ мкм}$ ) и практически не наблюдается в диапазоне  $\lambda > 2 \text{ мкм}$ . Это означает, что сформировавшаяся дымовая мгла представляет собой достаточно мелкодисперсную систему.

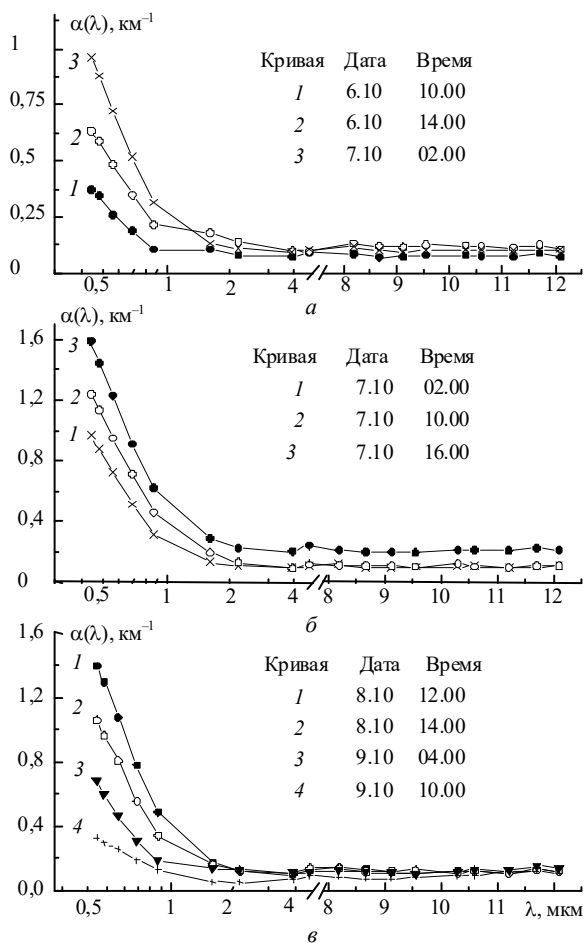


Рис. 3. Трансформация спектральной зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления в период появления (а), развития (б) и распада (в) дымовой мглы

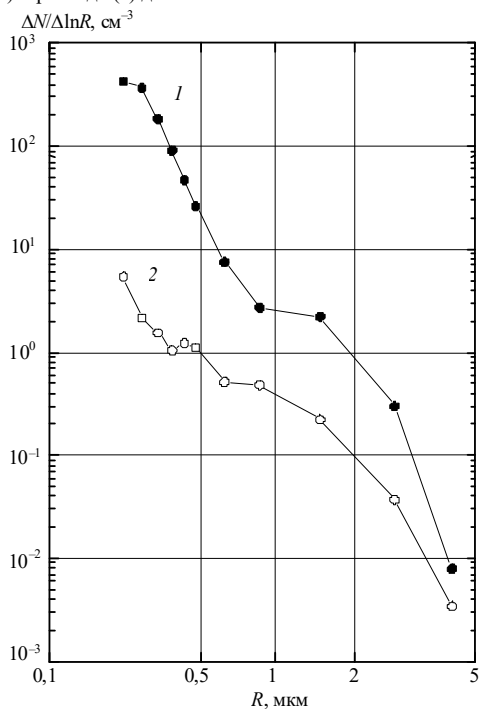


Рис. 4. Характерные распределения частиц по размерам

На рис. 4 приведена функция распределения частиц по размерам в период максимальной плотности дымовой мглы по данным фотоэлектрического счетчика (кривая 1) в сопоставлении с атмосферной дымкой, соответствующей средним летним концентрациям частиц для Западной Сибири в нижнем 500-метровом слое (кривая 2). В целом форма распределений по размерам частиц дымовой мглы соответствует среднестатистическому распределению для атмосферного аэрозоля и характеризуется наличием двух фракций частиц – мелкодисперсных ( $r < 1$  мкм) и грубодисперсных ( $r > 1$  мкм). Однако в условиях дымовой мглы имеет место увеличение счетной концентрации частиц всех размеров и особенно частиц мелкодисперсной фракции.

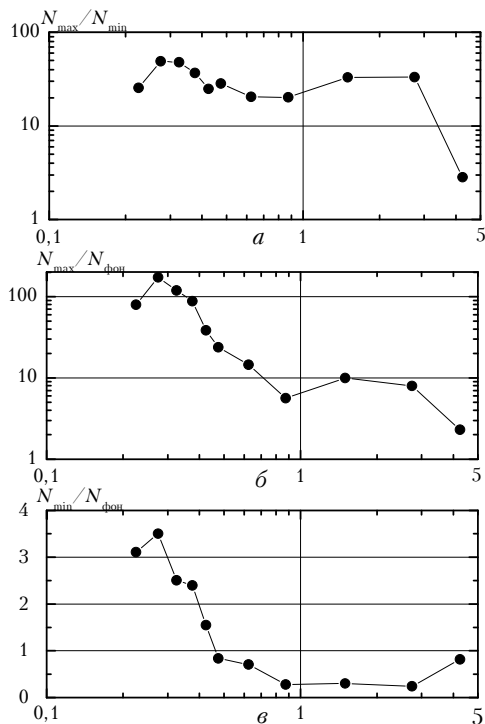


Рис. 5. Относительные вариации концентраций частиц

Динамика относительных количественных вариаций концентраций в отдельных диапазонах радиусов частиц на стадиях трансформации дымовой мглы и в сопоставлении с фоновыми условиями имеет свои особенности. Так, при распаде дымовой мглы от наибольших задымлений до стадии слабого замутнения изменения счетных концентраций  $N_{\max}/N_{\min}$  составляли до 50 раз для мелких (радиус  $r = 0,2-0,4$  мкм) и до 30 раз для крупных ( $r = 1-3$  мкм) частиц (рис. 5,а). В свою очередь максимальные концентрации во время мглы могут превышать фоновые характеристики (средние летние значения для Западной Сибири в нижнем 500-метровом слое воздуха)  $N_{\max}/N_{\text{фон}}$  в 175 раз (0,2–0,4 мкм) и в 10 раз (1–3 мкм) (рис. 5,б). Отметим, что сопоставление минимальных концентраций во мгле и средних региональных значений  $N_{\min}/N_{\text{фон}}$  показывает, что остаточное влияние распавшейся дымовой мглы приводит к превышению концентрации до 3,5 раза в области мелкодисперсных частиц (рис. 5,в). При этом пониженную относительно средней для региона концентрацию крупнодисперсных частиц следует объяснять почти безветренной погодой в период измерений и, соответственно, ослабленным выносом частиц пыли в атмосферу.

Приведенные на рис. 6 данные иллюстрируют некоторые особенности влияния дымовой мглы на изменчивость относительного содержания сажи в аэрозольных частицах. На рис. 6,а представлен характерный для периода июнь – сентябрь 1997 г. средний суточный ход относительного содержания сажи  $P$  в аэрозоле, нормированного на среднесуточное значение  $P_{\text{сут}}$  (кривая 1), который в рассматриваемых фоновых условиях характеризуется достаточно выраженной динамикой и наличием двух суточных максимумов: утреннего и вечернего. Вместе с тем в условиях дымовой мглы (кривая 2) ситуация кардинально меняется: суточный ход относительного содержания сажи нивелируется и становится слабоконтрастным. Аналогичная тенденция отмечена и для суточного хода коэффициента аэрозольного рассеяния. Полученные данные в совокупности свидетельствуют о том, что формирование плотной дымовой мглы, вероятно вследствие аномального замутнения воздуха, ослабляет действие динамических факторов, типичных для условий незадымленной атмосферы.

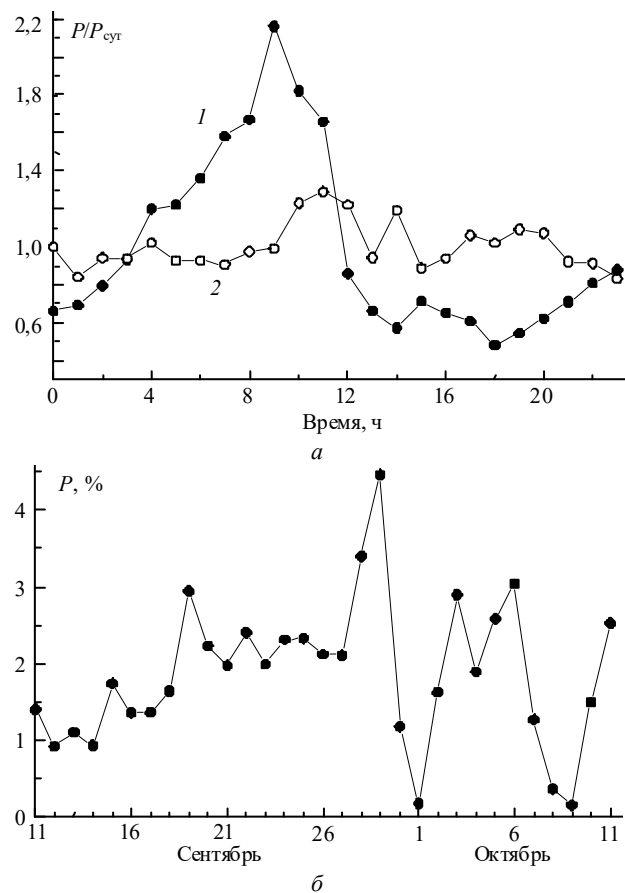


Рис. 6. Временной ход относительного содержания сажи в аэрозоле: а – нормированный средний суточный ход (1 – до дымовой мглы, 2 – в период мглы); б – динамика среднесуточных значений

На рис. 6,б представлен временной ход с 11 сентября по 11 октября среднесуточных значений относительного (в %) содержания сажи в аэрозоле  $P$ , определяемого для каждого отдельного измерения как отношение массовых концентраций сажи и аэрозоля. Анализ данных показал, что, несмотря на значительное возрастание в условиях мглы абсолютного содержания аэрозоля и сажи

по отдельности, величина относительного сажесодержания в частицах невелика (от 0,5 до 5 %).

В качестве наиболее вероятной причины объяснения небольших значений  $P$ , %, в период дымовой мглы может являться, на наш взгляд, то, что основная масса частиц в период накопления и пиковой аэрозольной нагрузки характеризовалась высоким содержанием в дымовом аэрозоле частиц пиролизной природы сгорания лесных горючих материалов. Ранее полученные нами результаты исследований в контролируемых условиях влияния режима сгорания на содержание сажи древесных дымов [8] показали, что при режиме пиролиза (сравнительно низкотемпературном разложении древесины при 300–500 °С, без пламени) образующиеся частицы содержат мало сажи и, соответственно, являются слабопоглощающими. Однако при режиме высокотемпературного горения с пламенем в дымах резко возрастает содержание сажи. Следует предположить, что основной вклад в формирование исследуемой дымовой мглы при лесных и торфяных пожарах внесла пиролизная составляющая дымов.

#### 4. Заключение

Таким образом, результаты выполненных исследований показывают, что при ослаблении адвективно-конвективных процессов в приземном слое воздуха интенсивные лесные пожары могут приводить к накоплению аэрозольной массы и проявлению аномально высоких концентраций аэрозолей со значительным содержанием мелкодисперсных частиц.

Выполненный анализ позволил изучить некоторые качественные и количественные особенности влияния дымовой мглы на аэрозольный состав атмосферы и ее оптические свойства:

- оптические и микрофизические параметры аэрозоля в дымовой мгле могут превышать соответствующие параметры незадымленной атмосферы на порядок величины и более;
- трансформация дымовой мглы в основном обусловлена изменчивостью мелкодисперсной фракции частиц (менее 1 мкм), которая имеет наибольшую амплитуду вариаций;
- плотная дымовая мгла нивелирует особенности суточной изменчивости основных параметров аэрозоля, характерные для незадымленной атмосферы;
- малое относительное содержание сажи в аэрозоле, вероятнее всего, обусловлено определяющим вкладом пиролизных процессов сгорания в формирование аэрозоля исследованной дымовой мглы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №97-05-65994).

1. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P. // J. of Aerosol Science. 1997. V. 28. P. S231–S232.
2. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Tumakov A.G., Yausheva E.P. // J. of Aerosol Science. 1995. V. 26. P. S347.
3. Burkov V.V., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. // The International Conference: «Mathematical and Physical Modelling of the Forest Fires and Their Ecological Consequences». 1997. Irkutsk, Russia, June 10–15. P. 125–126.
4. Hansen A.D.A., Rosen H., Novakov T. // Sci. Total Environ. 1984. V. 36. N 1. P. 191–196.

5. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 667–671.  
6. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 10. С. 3–11.

7. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. Вып. 1. С. 39–49.  
8. Козлов В.С., Панченко М.В. // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. N 5. С. 122–133.

*V.S. Kozlov, M.V. Panchenko, V.V. Polkin, Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov, N.N. Shchelkanov, E.P. Yausheva.* **Dynamical Peculiarities of Optical and Microphysical Characteristics of Aerosol in Smog.**

The measurements of spectral dependence of the aerosol attenuation coefficient within 0.44–12  $\mu\text{m}$  spectral range, aerosol scattering coefficient at 0.52  $\mu\text{m}$  wavelength, particles size distribution function within 0.4–10  $\mu\text{m}$ , and mass concentration of soot in aerosol during smoke haze (smog), which took place in the West Siberia region in October, 1997, are treated in the paper. It is shown that the smog results in increase (to an order of magnitude) of the coefficients of aerosol attenuation and scattering within visible range, as well as the number concentration and soot content. Main changes of the parameters take place within the region of small-size fraction (sizes less than 1  $\mu\text{m}$ ) and to a lesser degree – within coarse aerosol fraction. It is found that the smog reduces the peculiarities of diurnal variability of the scattering coefficient and soot content characterizing the atmosphere free of smoke. Low relative content of the soot in the smoke aerosol (1–4%) is indicative to pyrolysis origine of the smog particles formed during forest and peat fires. The smoke haze is assumed to contribute significantly into planetary radiation balance.