

И.А. Разенков, И.В. Самохвалов, С.Н. Таргонский

**ЛИДАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ  
ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ**

На примере дымового аэрозоля показана возможность дистанционного определения спектра размеров частиц плотных аэрозольных образований с помощью моностатического лидара с дискретно перестраиваемым углом поля зрения приемной системы. Приводятся данные натуральных экспериментов, полученные при различной относительной влажности воздуха.

Для дистанционного определения микроструктуры аэрозоля в настоящее время наиболее полно разработан метод многоволнового зондирования, в основе которого заложено использование лидара, работающего на нескольких длинах волн. Однако многоволновые лидарные системы достаточно сложны, требуют больших затрат как в изготовлении, так и в дальнейшей эксплуатации по сравнению с одночастотными лидарами.

Как отмечалось ранее в работе [1], микроструктура плотных аэрозольных образований может быть определена с помощью одночастотного лидара, оптическая система которого позволяет принимать эхо-сигналы при различных значениях угла поля зрения приемника. Информацию о спектре размеров частиц в этом случае несет многократное рассеяние, величина которого увеличивается по сравнению с однократным при увеличении угла поля зрения лидара. Вклад многократного рассеяния в эхо-сигнал можно рассчитать, ограничившись учетом двукратного рассеяния [1]. Если задать функцию распределения частиц по размерам в виде гамма-функции (данная модель применима для описания как естественных, так и промышленных аэрозолей), то оценку микроструктуры зондируемого аэрозоля получим, минимизируя по  $\bar{r}$ ,  $N$ ,  $\mu$  функционал:

$$F(\bar{r}, N, \mu) = \sum_i [P_{\text{э}}(\varphi_{0i}) - P_{\text{т}}(\varphi_{0i})]^2,$$

где  $\bar{r}$  — средний размер частиц;  $N$  — счетная концентрация,  $\mu$  — полуширина распределения;  $P_{\text{э}}(\varphi_{0i})$  и  $P_{\text{т}}(\varphi_{0i})$  — мощность сигнала обратного рассеяния, соответственно измеренная экспериментально и рассчитанная теоретически при различных углах поля зрения приемника  $\varphi_{0i}$ .

Мощность лидарного сигнала от однородного аэрозольного образования с учетом первой и второй кратностей рассеяния определяется выражением [2]:

$$P_{\text{т}}(\varphi_{0i}, z) = P_1(z) \left\{ 1 + \frac{4\pi\sigma_0(z-H)}{\gamma_{\pi}} \left[ \Gamma_1(\xi_{1i}) + \frac{z}{H} \Gamma_1 \times (\xi_{2i}) \right] + \frac{2\pi\sigma_0 z \varphi_{0i}}{\gamma_{\pi}} [\Gamma_2(\xi_{1i}) + \Gamma_2(\xi_{2i})] \right\},$$

где  $\sigma_0$  — коэффициент рассеяния;  $z$  — расстояние от лидара до исследуемого объема;  $\gamma_{\pi}$  — нормированная индикатриса рассеяния в направлении назад;  $H$  — расстояние от лидара до ближайшей границы аэрозольного облака;

$$P_1(z) = \frac{S_0 P_0 c \tau_{\text{л}}}{8\pi z^2} \gamma_{\pi} \tau_0 \exp \left[ -2 \int_0^z \alpha(z) dz \right]$$

— мощность отраженного сигнала за счет однократного рассеяния;  $S_0$  — площадь приемной системы лидара;  $P_0$  — пиковая мощность излучения лазера;  $\tau_{\text{л}}$  — длительность зондирующего импульса;  $c$  — скорость света в воздухе;  $\alpha(z)$  — коэффициент ослабления по трассе зондирования. Значения функционалов

$$\Gamma_1(\xi) = \int_0^{\xi} \gamma(\varphi) \gamma(\pi - \varphi) \operatorname{tg} \varphi / 2 d\varphi,$$

$$\Gamma_2(\xi) = \int_{\xi}^{\pi/2} \gamma(\varphi) \gamma(\pi - \varphi) d\varphi$$

определяются видом индикатрисы рассеяния и величиной угла поля зрения приемной системы лида-ра, входящего в выражение для

$$\xi_{1i} = 2 \operatorname{arctg} \frac{z \varphi_{0i}}{2(z-H)};$$

$$\xi_{2i} = 2 \operatorname{arctg} \frac{H \varphi_{0i}}{2(z-H)}.$$

Информация о спектре размеров частиц аэрозоля в неявном виде содержится в индикатрисе рас-сеяния, а именно в функционалах  $\Gamma_{1,2}(\xi)$ .

В настоящей работе приведены результаты натурных экспериментов по дистанционному исследо-ванию микроструктуры дымового аэрозольного образования с помощью моностатического лидара, в которых для определения параметров  $\bar{r}$ ,  $N$ ,  $\mu$  при интерпретации данных зондирования использовал-ся описанный выше метод.

Экспериментальные исследования были проведены летом 1986 и осенью 1987 гг. Зондирование осу-ществлялось с помощью лидара «Лоза-3», описанного в работе [3], оснащенного блоком диафрагм в фо-кальной плоскости приемника, что позволяет дискретно изменять угол поля зрения: 2, 4, 6, 8 и 10 мрад. Время перестройки угла поля зрения составляло 1–2 с. Время получения измерительной информации в исследуемой точке не более 10 с. Общая схема проведения экспериментов выглядела следующим обра-зом. Аэрозольное образование создавалось с помощью 3–4 сигнальных дымовых шашек, выставленных на прямой перпендикулярно направлению ветра на расстоянии около 10 м друг от друга. Это позволило создавать достаточно компактное, но вместе с тем широкое аэрозольное образование. «Захват» в поле зрения лидара и последующее сопровождение образования осуществлялось при помощи телевизионной камеры. Начальная точка зондирования выбиралась в 40–45 м от места создания аэрозольного образо-вания. Затем образование зондировалось через каждые 100–150 метров распространения. В ряде экспе-риментов, одновременно с лазерным зондированием, вблизи начальной точки производился отбор проб аэрозоля из образования с помощью контактных приборов. Определялась массовая концентрация и оце-нивался средний радиус аэрозольных частиц.

При обращении экспериментальных данных показатель преломления вещества аэрозоля прини-мался равным 1,52, что соответствует среднему значению показателя преломления для сухого атмо-сферного аэрозоля [4].

Типичное распределение частиц дымового аэрозоля по размерам для различных глубин проникнове-ния лазерного излучения в образование, полученное в результате обращения данных одного из оптиче-ских экспериментов, представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, средний радиус частиц и ширина распределения остаются практически постоянными по сечению дымового аэрозольного образования.

Результаты анализа проб, отобранных с помощью контактных приборов, показали, что форма частиц аэрозоля близка к шарообразной, а средний радиус частиц лежит в области 1,4–2,1 мкм, что согласуется с данными дистанционного зондирования. Величины счетной концентрации, полученные в результате пересчета отобранной массовой концентрации, дали значения в 3–10 раз меньше, чем значения счетной концентрации, полученные дистанционным методом. Это в какой-то степени можно объяснить низкой точностью определения массовой концентрации. Из-за быстротечности эксперимен-та общая масса отобранного на фильтры вещества была порядка сотых долей грамма.

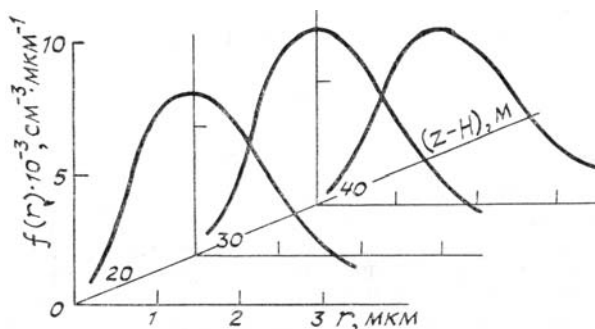


Рис. 1

На рис. 2 показана динамика изменения функции распределения частиц аэрозоля в процессе рас-пространения образования при различных значениях относительной влажности воздуха. Расстояние  $l$  измеряется от источника аэрозоля до исследуемого объема вдоль оси дымового шлейфа. Рис. 2, *а* соот-ветствует случаю, когда  $Q = 38\%$ , рис. 2, *б*  $Q \approx 100\%$ . Как нетрудно видеть из рисунка, в отличие от счетной концентрации, которая претерпевает значительные изменения от расстояния, средний радиус частиц на всех стадиях распространения меняется относительно слабо. Однако при большой влажности в

процессе распространения образования происходит увеличение среднего размера частиц. Как показали результаты численных исследований, возможное (при  $Q = 100\%$ ) изменение показателя преломления вплоть до величины 1,33, не приводит к увеличению среднего радиуса частиц, получаемому в результате обращения данных зондирования. Поэтому увеличение среднего радиуса на рис. 2, б, видимо, связано с обводнением исследуемого аэрозоля, что качественно согласуется с данными работы [5] о существенном обводнении фоновго аэрозоля при относительной влажности воздуха более 70%.

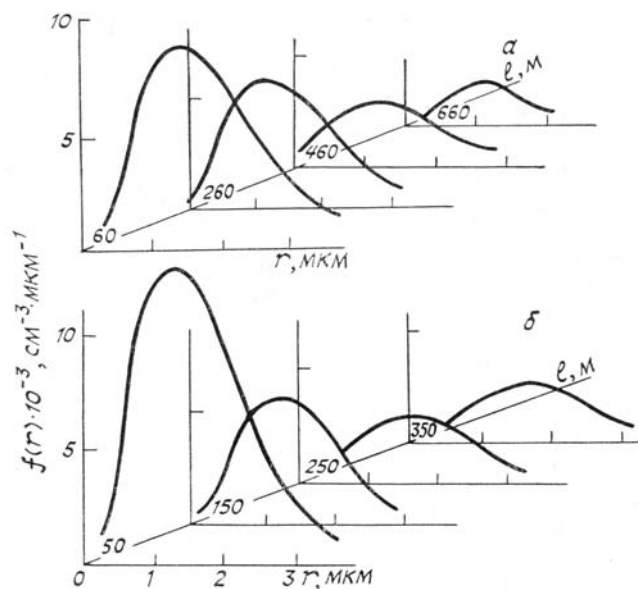


Рис. 2

Результаты исследований микроструктуры дымового аэрозольного образования с помощью моноста- тического лидара показали возможность дистанционного определения распределения частиц аэрозоля по размерам. Кроме того, оперативность получения измерительной информации позволяет анализировать пространственные вариации микроструктуры аэрозольного образования с целью выявления закономерностей их связи с метеоусловиями и физическими процессами, происходящими в атмосфере.

1. Самохвалов И. В., Таргонский С. Н. // В кн.: IX Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Труды). Ч. 1 Томск: ТФ СО АН СССР. 1987. С. 56–60.
2. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей/Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Новосибирск: Наука. 1986. 189 с.
3. Байрашин Г. С., Бурков В. В., Кауль Б. В. // В кн.: V Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Ч. IV Томск: ТФ СО АН СССР. 1978. С. 16–20.
4. Mathai S. V., Harrison V. W. // Atmospheric Environment. 1980. V. 14. P. 1131–1135.
5. Любовева Ю. С. // В кн.: Физика атмосферы и проблема климата. М.: Наука. 2980. С. 9–40.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
5 июля 1988 г.

I. A. Rasenkov, I. V. Samokhvalov, S. N. Targonsky. **Lidar Monitoring of Smoke Plume Microstructure.**

Remote measurements of the dense aerosol particle size distribution by means of a monostatic lidar employing a receiving system with a discretely tunable angle of the visual field are discussed. An example of lidar sounding of smoke plume microstructure is considered. Field-test data obtained in different relative humidity conditions are presented.