

В.Л. Бойченко, Г.П. Зенин, В.П. Кандидов, М.С. Прахов, Ю.П. Пытьев, А.И. Холодных

## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ЧЕТЫРЕХЧАСТОТНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ И АНАЛИЗ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ ПРИ ЕГО ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Приводятся результаты эксперимента по четырехчастотному лазерному зондированию атмосферного городского аэрозоля. Для абсолютных измерений сигнала обратного рассеяния проводилась калибровка лидара на рабочих длинах волн с помощью калибровочных экранов. Алгоритмы обработки лидарных измерений основываются на параметрических и моментной моделях оптических характеристик аэрозоля. Для оценки погрешностей исследуемых параметров используется метод редукции. Состоятельность математических моделей контролируется параметром надежности модели.

**1. Введение.** Дистанционное лазерное зондирование является эффективным средством получения информации об оптических и микрофизических параметрах атмосферного аэрозоля [1, 2]. При обработке результатов зондирования используются различные математические модели аэрозоля [3, 4]. Для оперативного анализа данных зондирования развиты такие методы, как метод оптимальной параметризации [5] и метод линейных оценок [6]. Сложной проблемой является анализ погрешности исследуемых параметров, отдельные вопросы которого обсуждаются в [7] для оптических характеристик.

Любой метод обработки результатов предполагает некоторую схему измерений, которая включает математическую модель аэрозоля и модель аппаратуры. Поэтому наряду с контролем погрешностей результатов необходим анализ состоятельности принятой модели эксперимента. Такой анализ на основе реальных измерений связан со значительными трудностями, и в задачах лазерного зондирования обычно не проводится.

В настоящей работе приводятся результаты исследования оптических, интегральных и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля типа дымки по данным четырехволнового лазерного зондирования. При интерпретации данных используются различные модели для описания свойств аэрозоля. Контроль погрешности исследуемых параметров осуществляется с помощью метода редукции [8]. Для анализа состоятельности модели привлекается понятие надежности модели [9].

**2. Экспериментальная установка и методика измерений.** Эксперимент по зондированию проводился на разработанном в МГУ макете лидара с рабочими длинами волн 1064, 532, 355 и 694 нм. Для получения излучения на указанных длинах волн используется лазер на YAG: Nd<sup>3+</sup> с последующим удвоением частоты в кристалле CDA и утроением в кристалле KDP, а также лазер на рубине. В оптическом тракте рубинового лазера используется выходной коллиматор, с помощью которого расходимость уменьшена до 1,5–2 мрад. Излучение лазера на YAG: Nd<sup>3+</sup> близко к одномодовому и имеет расходимость 1,5 мрад, что позволяет работать без выходных коллиматоров в оптических трактах его основной частоты и ее гармоник. Рассеянное излучение принимается телескопом типа Максудова–Кассегрена с диаметром входного зрачка 240 мм и регистрируется ФЭУ-84 и ФЭУ-83. Усиленный электрический сигнал с ФЭУ поступает на двухлучевой запоминающий осциллограф С8-14, с экрана которого регистрируется на фотопленку. Цикл измерения на всех длинах волн ~ 1–2 мин.

Для абсолютной калибровки лидара использовалась стандартная методика калибровочных экранов [10]. Экраны из тефлона и полиуретана располагались на расстоянии  $z_3 = 750$  м от излучателя. Спектральные и угловые характеристики коэффициентов рассеяния экранов определялись в лабораторных условиях. В приближении однократного рассеяния калибровочные константы равны

$$x_i = P(z_3, \lambda_i) z_3^2 / \rho(\lambda_i) W_0(\lambda_i),$$

где  $W_0(\lambda_i)$  — энергия импульса зондирования;  $P(z_3, \lambda_i)$  — величина сигнала рассеяния в вольтах от экрана, находящегося на расстоянии  $z_3$  от лидара;  $\rho(\lambda_i)$  — коэффициент рассеяния экрана. Погрешность определения калибровочных констант лидара составляет около 25%.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента, проведенного 16.10.87 г. в районе Ленинских гор г. Москвы в вечернее время при ясной погоде, относительной влажности воздуха 50%, метеорологической дальности видимости  $S_m = 10–15$  км. Лидарный сигнал  $P$  и его погрешность  $\Delta P$  представлены для ряда длин волн при изменении глубины зондирования от  $z_3$  до  $z_g = 1350$  м. В приближении однократного рассеяния и пренебрежении молекулярным рассеянием и ослаблением нормированный сигнал обратного рассеяния на аэрозоле имеет вид

$$\xi(i, z) = x_i \beta_\pi(z, \lambda_i, m) \exp\left(-2 \int_{z_3}^z \beta(z', \lambda_i, m) dz'\right) + v_i, \quad (1)$$

$$\xi(\lambda_i, z) = 2P(\lambda_i, z) z^2 / c\tau_{ii}(\lambda_i) W_0(\lambda_i),$$

где  $I = 1, \dots, I$  — число длин волн зондирования;  $\beta_p(z, \lambda_i, m)$ ,  $\beta(z, \lambda_i, m)$  — объемные коэффициенты обратного рассеяния и ослабления аэрозоля соответственно;  $z$  — глубина зондирования;  $m$  — комплексный показатель преломления материала частиц.

Таблица 1

Параметры лидара и результаты экспериментальных измерений

Длина вол- ны излуче- ния $\lambda_i$ , нм	$\kappa_i$ , км <sup>2</sup> В. стер.мДж <sup>-1</sup>	$\tau_i$ , нс	Энергия $W_0(\lambda_i)$ , мДж	$P(\lambda_i, z), 10^{-2}$ В			
				$z=0,9$ км	1,05	1,2	1,35
1064	72	15—20	14,1	$0,45 \pm 0,23$	0,45	0,2	—0,1
<b>694</b>	27	25—30	82,7	$5,0 \pm 1,0$	4,0	2,6	1,0
532	2560	15—20	6,9	$55 \pm 10,0$	32,5	17,5	10,0
355	1162	15—20	1,2	$11 \pm 2,0$	6,0	9,0	1,6

**3. Метод редукции в задаче интерпретации результатов эксперимента и надежность математической модели.** Эксперимент по лазерному зондированию атмосферного аэрозоля математически представляется следующей схемой измерений

$$\xi = A(f) + v, f \in \tilde{R}, \xi \in R, \xi = (\xi_1, \dots, \xi_I)^T, \quad (2)$$

где  $f$  — вектор искоемых параметров аэрозоля;  $A(f)$  — нелинейный оператор, вид которого зависит от используемых приближений и модели аэрозоля;  $\tilde{R}$  и  $R$  — пространства, которым принадлежат векторы искоемых параметров  $f$  и лидарных сигналов  $\xi$  соответственно;  $v$  — погрешность измерений с нулевым средним; ее корреляционный оператор  $\Sigma$  представляется диагональной матрицей, элементы которой есть значения дисперсии шума, измеряемые в отсутствие полезного сигнала.

Задача интерпретации данных лазерного зондирования заключается в оценке вектора параметров  $f$  по наблюдаемым значениям сигнала обратного рассеяния  $\xi$ . Такими параметрами могут быть, например, параметры функции распределения  $\phi(r)$  частиц по размерам ( $\bar{r}$ ,  $\mu$ ,  $N$  для  $\Gamma$ -распределения)

$$\text{или ее моменты } M_j = \pi N \int_0^\infty r^j \phi(r) dr.$$

При обработке результатов зондирования принципиальное значение приобретает контроль погрешности получаемых оценок. Метод редукции [8] позволяет решить задачу интерпретации эксперимента с минимальной погрешностью в рамках линейной модели схемы измерений. В этом случае

$$A(f) \approx A(\bar{f}) + A'(f - \bar{f}),$$

где точка  $\bar{f}$  определяется методом наименьших квадратов. В результате осуществляется переход к схеме измерения с линейной моделью  $[A', \Sigma]$ :

$$\tilde{\xi} = A'f + \vartheta, \tilde{\xi} = \xi - A(\bar{f}) + A'\bar{f}.$$

Основная идея метода редукции в задачах интерпретации косвенных измерений состоит в преобразовании экспериментальных данных  $\tilde{\xi}$  к такому виду, какой они имели бы при непосредственном измерении искомого вектора параметров. Другими словами, ищется такое преобразование  $T\tilde{\xi}$  сигнала обратного рассеяния  $\tilde{\xi}$ , которое можно интерпретировать как непосредственное измерение  $f$ , искаженное минимально возможной среднеквадратической погрешностью  $h = E\|T\tilde{\xi} - f\|^2$ , называемой погрешностью редукции. Преобразование  $T$  выбирается из условия

$$h = E\|T\tilde{\xi} - f\|^2 = \inf_{T'} E\|T'\tilde{\xi} - f\|^2 / T' \in R \rightarrow \tilde{R}, T'A' = I. \quad (3)$$

Отсюда

$$T = (A'^* \Sigma^{-1} A')^{-1} A'^* \Sigma^{-1}.$$

Конкретный вид преобразования  $T$  зависит от математической модели, в рамках которой решается задача редукции. Подробное описание метода редукции содержится в работе [8].

Априорную информацию о векторе параметров  $f$  можно использовать при интерпретации эксперимента. Эта информация задается в виде априорной оценки  $f_0$  вектора  $f$  и его корреляционного оператора  $F$ :

$$F_x = E((f - f_0)(x, f - f_0)) \forall x \in \tilde{R}.$$

Учет такой информации эквивалентен редукции в схеме двух измерений с моделью  $[\bar{A}, \bar{\Sigma}]$

$$\begin{cases} \tilde{\xi} = A'f + v_1, \\ f_0 = If + v_2 \end{cases}, \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} A' \\ I \end{pmatrix}, \quad \bar{\Sigma} = \begin{pmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & F \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Метод редукции развит в приближении теории второго порядка, т.е. предполагаются известными только первые два момента плотности распределения случайных величин. В отличие от байесовского оценивания, например [7], метод редукции не предполагает знания распределений случайных величин. Для модели  $[A', \Sigma]$  без априорной информации получаемая оценка  $T\tilde{\xi}$  совпадает с известной в математической статистике несмещенной оценкой с минимальной среднеквадратической погрешностью. В случае модели с априорной информацией получаемая оценка является смещенной оценкой с минимальной среднеквадратической погрешностью.

В рамках линейной модели можно ввести коэффициент чувствительности  $\eta_f$  искомых параметров  $f$  к погрешности экспериментальных данных  $\xi$ :

$$\eta_f = (\sigma_f^2 / \sigma_\xi^2)^{1/2}, \quad \sigma_\xi^2 = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J \sigma_{\xi_i}^2. \quad (5)$$

где  $\sigma_{\xi_i}$  — нормированная дисперсия сигнала обратного рассеяния на длине волны  $\lambda_i$ . Для параметрических моделей  $\sigma_f^2$  является средней дисперсией параметров функции распределения  $\bar{r}$ ,  $\mu$ ,  $N$ . В случае ряда идентичных параметров, например, моментов  $M_{j+1}$  или оптических характеристик  $\beta(\lambda_i)$ ,  $\beta_\pi(\lambda_i)$  под  $\sigma_f^2$  можно понимать величину

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sigma_{M_{j+1}}^2 \quad \text{или} \quad \sigma_f^2 = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J \sigma_{\beta(\lambda_i)}^2. \quad (6)$$

Состоятельность принятой модели измерения оценивается по ее надежности  $\alpha(\xi)$ , т.е. вероятности ошибочно отвергнуть модель на основании измерения  $\xi$  и априорной и дополнительной информации. Для модели  $[A', \Sigma]$  в предположении нормального закона распределения экспериментальных погрешностей измерения параметр надежности  $\alpha(\xi)$  равен [9]

$$\alpha(\xi) = \int_X P_{\chi^2}(t) dt, \quad X = \|\Sigma^{-1/2}(\tilde{\xi} - A'\hat{f})\|^2, \quad (7)$$

$\hat{f} = T\tilde{\xi}$  — результат решения задачи редукции (3);  $p_{\chi^2}(t)$  — плотность  $\chi^2$ -распределения с  $k = \dim R - \dim R(A')$  степенями свободы. Надежность (7) характеризует правомерность линейного приближения.

**4. Математические модели оптических свойств атмосферного аэрозоля.** Для получения конкретного вида оператора  $A$  при обработке лидарного эксперимента необходима математическая модель оптических свойств аэрозоля. В предположении сферичности и однородности частиц имеем

$$\beta(z, \lambda_i, m) = N(z) \int_0^\infty \pi r^2 K(r, \lambda_i, m) \varphi(r, z) dr, \quad (8)$$

$$\beta_\pi(z, \lambda_i, m) = N(z) \int_0^\infty \pi r^2 K_\pi(r, \lambda_i, m) \varphi(r, z) dr, \quad (9)$$

где  $N(z)$  – концентрация частиц;  $K, K_\pi$  – факторы эффективности ослабления и обратного рассеяния частицы радиуса  $r$  на длине волны  $\lambda_i$ .

Недостаточная информативность лидарных измерений позволяет определять лишь интегральные и оптические характеристики аэрозоля. Для восстановления функции распределения  $\varphi(r)$  в этом случае необходима априорная информация, например, в виде задания класса функций  $\varphi(r)$ .

В работе рассмотрены следующие математические модели аэрозоля:

а) моментная модель [11], в которой коэффициенты обратного рассеяния  $\beta_\pi$  и ослабления  $\beta$  представляются в виде линейных форм моментов функции  $\varphi(r)$ , в общем случае неизвестной:

$$\beta(\lambda_i) = \pi \sum_{j=1}^J B_{ij} M_{j+1}, \quad \beta_\pi(\lambda_i) = \pi \sum_{j=1}^J D_{ij} M_{j+1}. \quad (10)$$

Коэффициенты разложения  $B_{ij}, D_{ij}$  суть коэффициенты аппроксимации факторов эффективности  $K(r, \lambda_i, m)$  и  $K_\pi(r, \lambda_i, m)$  полиномами от  $r$ :

$$K(r, \lambda_i) = \sum_{j=1}^J B_{ij} r^{j-1}, \quad K_\pi(r, \lambda_i) = \sum_{j=1}^J D_{ij} r^{j-1}; \quad (11)$$

б) параметрическая модель, в которой вид функции распределения  $\varphi(r)$  считается заданным. В работе использовано Г-распределение с неизвестными параметрами  $\bar{r}, \mu, N$ , т.е.

$$\varphi(r) = N(\mu + 1/\bar{r})^{\mu+1} r^\mu \exp(-r(\mu + 1)/\bar{r}) \Gamma(\mu + 1). \quad (12)$$

В этой модели оптические характеристики  $\beta_\pi$  и  $\beta$  вычисляются по (8, 9), где ядра  $K_\pi, K$  рассчитываются численно по точным формулам теории Ми [12].

Такой подход требует больших вычислительных затрат, поэтому рассмотрим приближенную «параметрическую аналитическую модель», для которой в [13] получена функциональная зависимость для  $\beta, \beta_\pi$  в виде  $\beta = F_1(r, \mu, N), \beta_\pi = F_2(\bar{r}, \mu, N)$ .

При использовании аппроксимации (11), принятой в модели моментов, задание  $\varphi(r)$  позволяет выразить моменты  $M_{j+1}$  через  $\bar{r}, \mu, N$ :

$$M_{j+1} = N(\bar{r}/(\mu + 1))^{j+1} (\mu + 1) \cdot \dots \cdot (\mu + j + 1). \quad (13)$$

В этом случае задача сводится к нахождению параметров  $\bar{r}, \mu, N$ , определяющих согласно (10) оптические характеристики аэрозоля. Такую модель можно назвать «параметрической моментной».

**5. Интерпретация результатов эксперимента и их обсуждение.** В соответствии с условиями эксперимента (относительная влажность воздуха 50%) комплексный показатель преломления  $m = 1,5 - i \cdot 0$  [3].

Остановимся вначале на результатах обработки экспериментальных данных на основе «моментной модели», использование которой не требует априорного задания  $\varphi(r)$ . Моменты, восстановленные при  $J = 4$ , приведены в первой графе табл. 2 для первого слоя по трассе зондирования. Коэффициенты обратного рассеяния  $\beta_\pi$  и ослабления  $\beta$ , вычисленные по (10), представлены на рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента ослабления имеет максимум на длине волны около 700 нм. Коэффициент обратного рассеяния монотонно убывает с ростом длины волны зондирования. Спектральный ход восстановленных оптических характеристик аэрозоля практически не меняется с расстоянием по трассе зондирования.

Анализ точности восстановления параметров показал, что для модели моментов использование редукции приводит к завышенным оценкам погрешности. Так, в численном эксперименте получено, что по методу редукции коэффициенты чувствительности для моментов составляют  $\eta_m = 64,0$ , для коэффициентов обратного рассеяния  $\eta_{\beta_\pi} = 3,5$ , для коэффициентов ослабления  $\eta_\beta = 33$ . Однако исследования методом статистических испытаний показывают, что  $\eta_m = 2,0 - 1,6$ ,  $\eta_{\beta_\pi} = 0,9 - 1,0$ ,  $\eta_\beta = 1,0 - 1,3$ , если относительная среднеквадратическая погрешность измерений составляет  $\sigma_\xi = 0,1 - 0,2$ . Видно, что точность восстановления моментов низка, тогда как погрешность восстановления оптических характеристик вполне удовлетворительна. При этом коэффициенты обратного рассеяния определяются несколько точнее, чем ослабления.

Относительная погрешность измерений  $|\xi_i|$  меняется в зависимости от длины волны излучения  $\lambda_i$  и глубины зондирования. Как видно из табл. 1, с наименьшей точностью измеряется сигнал обратного рассеяния на длине волны  $\lambda_i = 1064$  нм. На остальных длинах волн относительная погрешность измерения приблизительно одинакова. При таких погрешностях не удается получить приемлемые

оценки параметров  $\Gamma$ -распределения  $\bar{r}$ ,  $\mu$ ,  $N$ . Например, в результате обработки данных зондирования по параметрической аналитической модели, проведенной с экспериментальными погрешностями, получено, что на первом слое трассы  $\bar{r} = 0,20 \pm 0,07$ ;  $\lg N = 3,0 \pm 0,8$ ;  $\mu = 20,0 \pm 50,0$ ; с глубиной зондирования погрешности быстро растут. Это означает, что в экспериментальных данных недостаточно информации об искомым параметрах и использование параметрических моделей без априорных предположений является проблематичным.

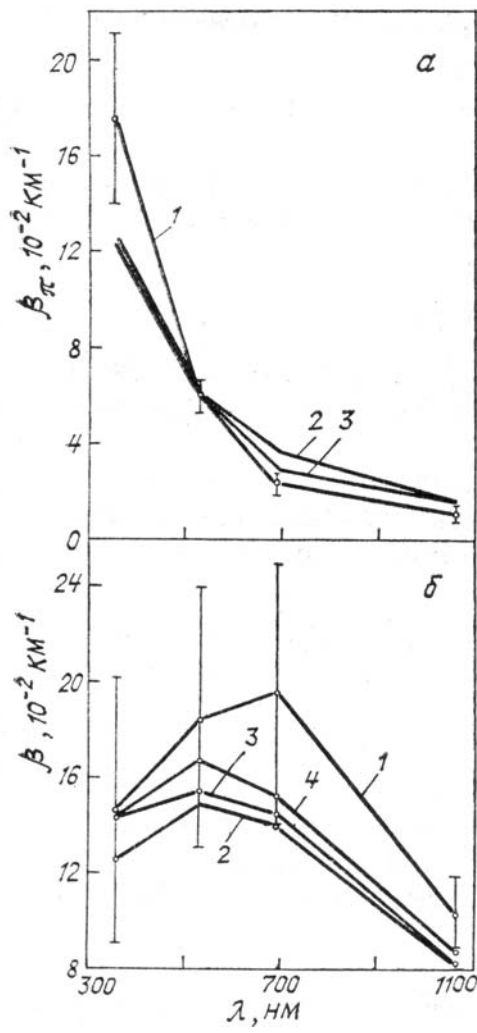


Рис. 1. Спектральный ход коэффициентов обратного рассеяния (а) и ослабления (б), рассчитанных по моделям: 1 — моментной; 2 — параметрической; 3 — параметрической моментной; 4 — параметрической аналитической, на первом слое  $z = 0,75-0,9$  км трассы зондирования. Указана погрешность моментной модели. Для  $\beta_{\pi}$  кривые 2 и 4 совпадают

В настоящее время накоплены обширные сведения о свойствах наиболее характерных видов аэрозоля. Включение такой априорной информации в схему обработки экспериментальных данных позволяет окончательно определить задачу. Обработка лидарных сигналов проводилась в предположении, что исследуемая среда представляет собой случайную реализацию аккумулятивной фракции городского аэрозоля с параметрами  $\Gamma$ -распределения  $\bar{r}_0 = (0,3 \pm 0,2)$  мкм,  $\lg N_0 = (1,5 \pm 1,0)$ ,  $\mu = 5,0 \pm 4,0$  [7].

Схема (4), соответствующая использованию априорной информации, применялась при обработке натурального эксперимента на основе параметрических моделей. Оказалось, что параметр  $\mu$  не зависит от вида параметрической модели и практически определяется априорной информацией. Рис. 2 иллюстрирует изменение  $\bar{r}$  и  $\lg N$  с глубиной зондирования при восстановлении этих параметров в рамках параметрических моделей. Результаты восстановления отличаются друг от друга менее чем на 10%, несмотря на то что модели построены при различных аппроксимациях. Это свидетельствует о том, что априорное задание класса функций распределения и привлекаемая априорная информация являются достаточно сильными ограничениями. Подтверждением сказанного могут служить данные табл. 2, где приведены моменты функции распределения. Их значения, рассчитанные по восстановленным в рамках параметрических моделей величинам  $\bar{r}$ ,  $\lg N$ ,  $\mu$ , практически совпадают. Тогда как моменты, полученные по моментной модели, отличаются от рассчитанных по параметрическим моде-

лям. Заметим, однако, что различие в массовой концентрации, определяемой моментом  $M_3$ , не более 6% для всех моделей.

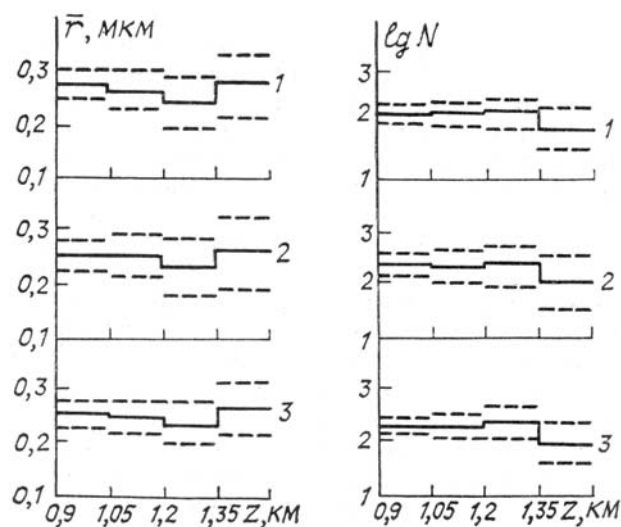


Рис. 2. Изменение по трассе зондирования восстановленных в рамках различных моделей параметров  $\Gamma$ -распределения  $\bar{r}$ ,  $\lg N$ : 1 — параметрическая модель; 2 — параметрическая аналитическая; 3 — параметрическая моментная. Штриховой линией указан коридор погрешности

Коэффициенты ослабления  $\beta(\lambda_i)$  и обратного рассеяния  $\beta_p(\lambda_i)$ , восстановленные в рамках параметрических моделей, отличаются друг от друга менее чем на 15%, тогда как отличие их от рассчитанных по моментной модели достигает 40% (рис. 1). Это также является свидетельством того, что априорное задание класса функций распределения оказывает сильное влияние на получаемые результаты. В то же время спектральный ход оптических характеристик, рассчитанных по моментной и параметрическим моделям, качественно совпадает для всех рассмотренных моделей, что повышает достоверность интерпретации эксперимента. Отметим, что параметрические модели ориентированы на интерпретацию  $\bar{r}$ ,  $\lg N$ ,  $\mu$  и оптимальны в смысле минимума погрешности именно для этих целей. Использование дополнительной информации в моментной модели не влияет на величину оценок моментов и оптических характеристик и приводит к уменьшению погрешности восстановления. На рис. 1 и в табл. 2 указаны погрешности, полученные методом редукции с учетом априорной информации.

Таблица 2

Восстановленные по экспериментальным данным, приведённым в табл. 1, на первом слое  $z = 0,75-0,9$  км трассы зондирования моменты функции распределения частиц по размерам  $\phi(r)$  при использовании различных моделей

Моменты	Модели			
	моментная $J=4$	параметрическая	параметрическая	
			аналитическая	моментная ( $J=8$ )
$M_2$ , мкм <sup>2</sup> см <sup>-3</sup>	$8,0 \pm 1,0$	14,0	15,8	15,6
$M_3$ , мкм <sup>3</sup> см <sup>-3</sup>	$5,0 \pm 1,0$	5,0	5,3	5,2
$M_4$ , мкм <sup>4</sup> см <sup>-3</sup>	$1,4 \pm 0,3$	2,0	2,0	1,9
$M_5$ , мкм <sup>5</sup> см <sup>-3</sup>	$0,05 \pm 0,3$	0,9	0,8	0,8

Исследование состоятельности моделей показало, что для всех рассмотренных моделей при использовании дополнительной информации параметр надежности  $\alpha(\xi)$  составляет 0,98–0,99. Тем самым на основании экспериментальных данных и априори привлекаемой информации нельзя отвергнуть ни одну из рассматриваемых моделей.

В то же время модели существенно различаются по вычислительным затратам, которые связаны, в основном, с расчетами оптических характеристик. Вычисление  $\beta_p$  и  $\beta$  по параметрической аналитической модели приблизительно в 3–5 раз быстрее, чем по параметрической. Еще значительно сокращается время вычисления  $\beta$  и  $\beta_p$  по моментным моделям. Алгоритм восстановления параметров аэрозоля с использованием моментных моделей реализован на микро-ЭВМ типа ДВК. Время обработки данных зондирования для четырех точек по трассе порядка 10 мин.

Представляет интерес исследовать влияние  $m$  на результаты интерпретации. Для иллюстрации этого проведена обработка данных в рамках параметрической модели при  $m = 1,33 - i \cdot 0$  и той же дополнительной информации об аэрозоле. В результате для первого зондируемого слоя получено  $\bar{r} = (0,50 \pm 0,07)$  мкм,  $\lg N = 2,0 \pm 0,2$ ,  $\mu = 4,8 \pm 3,7$ . При этом надежность модели понизилась с 0,98 до 0,85. Оптико-метеорологические условия, в которых проходил эксперимент, свидетельствуют о том, что значение комплексного показателя преломления  $m = 1,5 - i \cdot 0$  более вероятно, чем  $m = 1,33 - i \cdot 0$ . С этим обстоятельством, по-видимому, и связано понижение надежности модели.

**6. Заключение.** Модель моментов позволяет получить оптические и интегральные характеристики аэрозоля при четырехволновом зондировании в отсутствие априорной информации о размерах аэрозольных частиц. При этом коэффициенты обратного рассеяния и ослабления определяются с относительной погрешностью порядка погрешности измерений лидарных сигналов.

Использование априорной информации о диапазоне изменения параметров аэрозоля позволяет обрабатывать экспериментальные данные невысокой точности и получать с помощью метода редукции приемлемые оценки погрешностей этих параметров для различных моделей. Задание  $\phi(r)$  в параметрических моделях является сильным ограничением при интерпретации лидарных измерений. Поэтому, когда такие предположения сделать нельзя, предпочтительнее использование моментной модели, в которой вид  $\phi(r)$  априори не задается.

Моментные и параметрическая аналитическая модели требуют меньших вычислительных затрат, чем параметрическая модель. Поэтому их можно рекомендовать для оперативной обработки результатов эксперимента.

1. Зуев В. Е., Наац И. Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1982. 242 с.
2. Чайковский А. П. //ЖПС. 1986. Т. 44. № 2. С. 183.
3. Иванов А. П. и др. //Изв. АН СССР. ФАО. 1986. Т. 22. № 8. С. 813.
4. Наац И. Э. Метод обратной задачи в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука 1987. 198 с.
5. Макиенко Э. В., Наац И. Э. //В кн.: Атмосферная оптика. М.: Наука. 1974. С. 186.
6. Чайковский А. П., Щербаков В. Н., Иванов А. П. //Докл. АН БССР. 1984. Т. 28. № 9. С. 792.
7. Креков Г. М., Кавкьянов С. И., Крекова М. М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. 185 с.
8. Пытьев Ю. П. //Мат. сборник. 1983. Т. 120 (162). № 2. С. 240.
9. Пытьев Ю. П. //ДАН СССР. Т. 295. № 3. 1987. С. 542.
10. Зуев В. Е. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука. 1986. 192 с.
11. Кандидов В. П., Прахов М. С. //ЖПС. 1988. Т. 44. № 6. С. 935.
12. Грачев Ю. Н. //В кн.: Математическое моделирование в задачах радиотехники и электроники. М.: ИРЭ АН СССР. 1984. С. 227.
13. Бойченко В. Л. и др. Изв. АН СССР. 1986. Т. 50. № 11. С. 2262.

Московский госуниверситет  
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
3 августа 1988 г.

V. V. Boytchenko, G. P. Zenin, V. P. Kandidov, M. S. Prakhov, Y. P. Pytyev, A. I. Kholodnykh. **The Experiment of Four-Waves Laser Sounding of the Atmosphere Aerosol and Interpretation Analysis of the Models Quality.**

The experimental results of four-waves laser monitoring of atmosphere urban aerosol are given. Lidar calibration was made for measuring of absolute value of backscattering signal on sounding waves with using of calibration targets. The calculation algorithms are based on parametric and moments models of aerosol optical characteristics. In order to estimate at the indeterminations of investigated parameters values reduction method is used. The validity of the mathematical models is monitored by model reliability parameter.