

А.П. Чайковский

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО СЛОЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ЭХОСИГНАЛА

Излагается методика калибровки и обработки данных лазерного зондирования при измерении степени деполяризации излучения, рассеянного стратосферным аэрозолем.

Измерение поляризационных характеристик локационного импульса при зондировании стратосферы дает дополнительную информацию о структуре частиц стратосферного аэрозольного слоя (САС) [1]. Достаточно зарегистрировать такой параметр, как степень деполяризации локационного сигнала  $Q$  при зондировании САС линейно поляризованным излучением, чтобы идентифицировать слои, содержащие несферические частицы, обязанные своим происхождением выбросам вулканического пепла, переохлаждению стратосферы и образованию кристаллических облаков [2, 3]. Однако когда аэрозольное рассеяние меньше молекулярного и деполяризованная компонента локационного сигнала мала, что характерно для фонового состояния САС, информация об аэрозоле может быть получена только при использовании соответствующей этим условиям методики измерений и алгоритма обработки данных. Настоящая работа посвящена рассмотрению этого вопроса.

Измеряемыми характеристиками при зондировании САС являются компоненты интенсивности локационного сигнала  $I_1$  и  $I_2$ , регистрируемые при ориентации анализатора параллельно и перпендикулярно плоскости поляризации зондирующего импульса. По ним рассчитывается степень деполяризации  $Q = I_2/I_1 = \beta_2/\beta_1$ , где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — показатели обратного рассеяния, соответствующие двум компонентам светового потока [2]. Параметр  $Q$  связан с элементами матрицы обратного рассеяния элементарного объема  $S_{ij}$ :

$$Q = \frac{S_{11} - S_{22}}{S_{11} + 2S_{12} + S_{22}}. \quad (1)$$

Методика оценки параметра  $Q(h)$  [2] основывается на нормировке этой функции к значению в точке  $h_0$  — слою с минимальным содержанием аэрозольной компоненты, который находится на высоте около 35 км или в области тропопаузы ( $Q(h_0) \approx 0,05$ ). При этом

$$Q(h) = \frac{N_2(h)}{N_1(h)} \frac{N_1(h_0)}{N_2(h_0)} Q(h_0), \quad (2)$$

где  $N_1(h_0)$  и  $N_2(h)$  — число зарегистрированных фотонов из слоя на высоте  $h$  в заданном интервале  $\Delta h$  соответственно в первом и втором каналах регистрирующей системы.

Однако при исследовании малых концентраций стратосферного аэрозоля вместо параметра  $Q(h)$  целесообразно применять  $Q_a(h) = \beta_{a,2}/\beta_{a,1}$  — степень деполяризации при рассеянии на аэрозольной компоненте атмосферы. Кроме величин  $Q$  и  $Q_a$ , характеризующих деполяризацию локационного сигнала, по результатам измерений  $N_1(h)$  и  $N_2(h)$  может быть восстановлено отношение обратного рассеяния  $R = \beta_a + \beta_M/\beta_M$ , где  $\beta_a$  и  $\beta_M$  — показатели обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния, характеризующие вклад аэрозоля в обратное рассеяние. Аналогично могут рассматриваться параметры  $R_1$  и  $R_2$  для двух компонент отраженного сигнала. Из всех величин  $Q$ ,  $Q_a$ ,  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  только две являются независимыми. Отсюда справедливы соотношения

$$Q = \gamma \frac{R_2}{R_1}. \quad (3)$$

$$R = \frac{R_1 + \gamma R_2}{\gamma + 1} = \frac{R_1(Q + 1)}{\gamma + 1}. \quad (4)$$

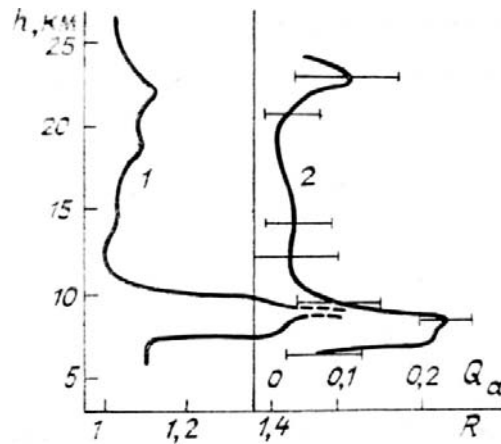
$$Q_a = \gamma \frac{(R_2 - 1)}{(R_1 - 1)} = \frac{R_1 Q - \gamma}{R_1 - 1}, \quad (5)$$

где

$$\gamma = \frac{\beta_{2, \text{м}}}{\beta_{1, \text{м}}} = 0,017 \text{ [4]}.$$

Как следует из (5) и приведенного ниже выражения (9), для погрешности измерений параметра  $Q_a$  при относительной ошибке задания  $Q(h_0)$  порядка 0,3 ... 0,4 [2] и условиях  $R \sim 1$  и  $Q \sim \gamma$ , что характерно для фонового состояния САС, лидарные измерения становятся неинформативными относительно параметра  $Q_a(h)$ . Чтобы исключить этот фактор, была разработана методика измерений, при которой по слою в области  $h_0$  калибруется только параметр  $R_1(h)$ . Калибровка лидара при восстановлении  $Q(h)$  осуществляется по результатам измерения числа фотонов  $N_1^0(\Delta H)$  и  $N_2^0(\Delta H)$  из слоя  $\Delta H$ , проведенного при ориентации плоскости поляризации излучения на выходе источника под углом  $45^\circ$  к направлению ориентации анализаторов на приемнике. В этом случае

$$Q(h) = \frac{N_2(h)}{N_1(h)} \frac{N_1^0(\Delta H)}{N_2^0(\Delta H)}. \quad (6)$$



Профили параметров  $R$  и  $Q_a$ : 1 —  $R(h)$ ; 2 —  $Q_a(h)$

Для достижения достаточной точности  $\Delta H \sim 5$  км относительная погрешность калибровки в данном случае может быть уменьшена до величины приблизительно 0,02. Калибровка может проводиться также посредством засветки входного зеркала деполаризованным излучением. Однако при этом может проявляться неоднородность формируемого светового поля.

Расчет профиля  $R_1(h)$  проводится по алгоритму, разработанному в [5] для оценки параметра  $R(h)$ , с той разницей, что в качестве минимального значения в точке  $h_0$  принимается величина  $R_1(h_0)$ , связанная с используемой в [5]  $R(h_0)$  соотношением

$$\frac{R_1(h_0) - 1}{R(h_0) - 1} = \frac{1 + \gamma}{1 + Q_a(h_0)}. \quad (7)$$

Структура (7) такова, что ошибка оценки  $R_1(h_0)$  мало зависит от погрешности задания  $Q_a(h_0)$ .

Профили  $R(h)$  и  $Q_a(h)$  определяются по формулам (4), (5). В реальном эксперименте на результаты измерений профиля  $Q_a(h)$  существенно влияют малые отклонения в ориентации плоскости поляризации излучения источника относительно анализаторов в канале регистрации, а также частичная деполаризация в каналах источника относительно анализаторов в приемнике. Этот фактор может быть учтен путем перехода в (4) и (5) от величины  $Q$  к  $Q - Q_0$ , где  $Q_0$  — предварительно измеренная для данного прибора величина. На рисунке приведены профили параметров  $R(h)$  и  $Q_a(h)$ , измеренные в соответствии с изложенной на установке, описанной в [6]. Высокие значения  $R$  и  $Q_a$  ниже уровня тропопаузы  $h_0 = 10$  км характеризуют, вероятно, слой перистой облачности.

Величины относительной погрешности  $\varepsilon$  оценок параметров  $R(h)$  и  $Q_a(h)$  определяются выражениями

$$\varepsilon^2(R) \approx \varepsilon^2(R_1) + \varepsilon_1^2. \quad (8)$$

$$\varepsilon^2(Q_a) = \frac{R_1^2}{\gamma^2} \frac{Q^2 \varepsilon_2^2 + Q_0^2 \varepsilon_3^2}{(R_1/\gamma(Q - Q_0) - 1)^2} + \varepsilon_1^2 \frac{R_1^2}{(R_1 - 1)^2} \frac{\left(\frac{R_1(Q - Q_0)}{\gamma} - 1\right)}{(R_1/\gamma(Q - Q_0) - 1)^2} +$$

$$+ \varepsilon_0^2 \frac{R_1^2 \left(\frac{Q - Q_0}{\gamma} - 1\right)}{(R_1 - 1)^2 \left(\frac{R_1(Q - Q_0)}{\gamma} - 1\right)^2}, \quad (9)$$

где

$$\varepsilon_0^2 = \varepsilon^2(R_1(h_0)) + \varepsilon^2(\beta_M(h_0)) + \varepsilon^2(\beta_M(h)) - 2C(h_0, h)\varepsilon(\beta_M(h_0))\varepsilon(\beta_M(h)) + \varepsilon^2(N_1(h_0)) + \varepsilon^2(T^2(h - h_0));$$

$\varepsilon_1^2 = \varepsilon^2(N_1(h))$ ;  $\varepsilon_2^2 = \varepsilon^2(N_2(h)) + \varepsilon^2(N_1^0) + \varepsilon^2(N_2^0)$ ;  $\varepsilon_3^2 = \varepsilon^2(Q_0), T(h - h_0)$  — ослабление излучения в слое  $h - h_0$ ;  $C(h, h_0)$  — коэффициент корреляции показателя обратного молекулярного рассеяния в точках  $(h, h_0)$ . Оценки величин  $\varepsilon(R_1)$ ,  $\varepsilon_0, \dots$ , входящих в (8) и (9), могут быть проведены аналогично методике, изложенной в [5]. В эксперименте, результаты которого представлены на рисунке,  $\varepsilon(R) \sim 0,05$ ,  $\varepsilon(Q_a(h))$  — от 0,15 до 1. Среднеквадратическое отклонение оценки  $Q_a(h)$  на рисунке показано горизонтальными отрезками. Характерно увеличение относительной погрешности  $\varepsilon(Q_a(h))$  при малых  $R$  и  $Q$ .

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Козлов В.Н., Самохвалов И.В. //VI Всес. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез. докл. (ч. 1). Томск: ИОА СО АН СССР. 1980. С. 11—14.
2. Iwasaka Y. //J. Geomag. Geoelectr. 1986. V. 38. № 1. P. 729.
3. Kent G.S., Poole L.R., McCormick M.P. //J. Atm. Sci. 1986. V. 43. № 20. P. 2149.
4. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
5. Russel P.V., Swisler J.Y. and McCormick M.P. //Appl. Opt. 1979. V. 18. № 22. P. 3783.
6. Бородавко А.Н., Воробей Н.П., Губский В.И. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 109—115.

Институт физики АН БССР,  
Минск

Поступило в редакцию  
29 июня 1990 г.

**A. P. Chaikovskii. Methods of Investigation of the Stratospheric Aerosol Layers Structure Based on the Results of the Laser Echo-Signal Depolarization Measurement.**

The technique of calibration and processing of laser sounding data by measuring the degree of polarization emission scattered by stratospheric aerosol is described.