

С.Н. Волков, Б.В. Кауль, В.А. Шапранов, Д.И. Шелефонтьук

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СКР-КАНАЛОМ СТАНЦИИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

На основе сравнения интенсивностей двух участков спектра вращательных линий спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота измерен вертикальный профиль температуры до высоты 14,5 км. Дана оценка погрешности определения профиля температуры в зависимости от высоты. Экспериментально подтверждены принятые при проектировании станции лазерного зондирования оценки возможности измерения температуры СКР-методикой до высот расположения тропопаузы.

Как известно [1], температура воздуха может быть измерена на основе сравнения интенсивностей двух участков спектра вращательных линий спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота. При этом используется температурная зависимость интенсивности от квантового числа.

$$I(t) \sim \exp\left[\frac{-BJ(J+1)}{KT}\right], \quad (1)$$

где  $B = 1,9895$ ;  $J$  — вращательное квантовое число.

Лидарный эхосигнал в счете фотонов для выделенного участка вращательного СКР выглядит следующим образом:

$$N(\lambda, H) = C \Phi(H) \beta_{J\pi}^{\text{кр}}(H) T(\lambda_0, H) T(\lambda, H) H^{-2} + N_{\text{ш}}, \quad (2)$$

где  $C$  — аппаратная постоянная, включающая число излученных фотонов;  $\Phi(H)$  — геометрический фактор;  $\beta_{J\pi}^{\text{кр}}(H)$  — объемный коэффициент рассеяния назад для вращательного СКР с квантовым вращательным числом  $J$ ;  $T(\lambda, H)$  — объемный коэффициент пропускания;  $H$  — высота;  $N_{\text{ш}}$  — фон.

Сравнение интенсивностей двух участков вращательного СКР позволяет исключить влияние нестабильности источника излучения, искажающее влияние геометрического фактора и влияние атмосферного пропускания. Тогда с учетом (1) и (2) получим

$$R = \frac{N_1 - N_{\text{ш1}}}{N_2 - N_{\text{ш2}}} = \exp\left[\frac{\alpha}{T} + \beta\right], \quad (3)$$

где  $R$  — отношение двух сигналов;  $\alpha, \beta$  — аппаратные постоянные, зависящие от выбора участков вращательного СКР;  $T$  — температура. Откуда можно получить выражение для температуры

$$T = \frac{\alpha}{\ln R - \beta}. \quad (4)$$

Таким образом, определение вертикального профиля температуры опирается на оптимальный выбор участков вращательного СКР с разными вращательными квантовыми числами. При этом, как показывают расчеты [2], чувствительность  $R$  к температуре достигает 1,5–2% на градус.

Из (3) можно получить оценку погрешности температуры:

$$\delta T = \frac{T^2}{\alpha} \frac{\delta R}{R}, \quad (5)$$

где

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial N_{c1}}\right)^2 \delta^2 N_{c1} + \left(\frac{\partial R}{\partial N_{c2}}\right)^2 \delta^2 N_{c2} + \left(\frac{\partial R}{\partial N_{\text{ш1}}}\right)^2 \delta^2 N_{\text{ш1}} + \left(\frac{\partial R}{\partial N_{\text{ш2}}}\right)^2 \delta^2 N_{\text{ш2}}} \quad (6)$$

здесь  $N_c = N - N_{\text{ш}}$  — количество сигнальных отсчетов.

Полагая статистику принимаемых фотоотсчетов пуассоновской, т.е.  $\delta^2 N_c = N_c$  и  $\delta^2 N_{\text{ш}} = N_{\text{ш}}$ , из (6) получим

$$\delta R = \frac{\sqrt{N_1 + R^2 N_2}}{N_2 - N_{\text{ш2}}}. \quad (7)$$

Обозначая вклад шума в сигнал как

$$\theta = \frac{N_{ш}}{N_c}, \quad (8)$$

преобразуем (5) к более удобному виду

$$\delta T = \frac{T^2}{\alpha} \sqrt{\frac{1}{(1 - \theta_1)^2 N_1} + \frac{1}{(1 - \theta_2)^2 N_2}}. \quad (9)$$

СКР-канал станции лазерного зондирования организован по коаксиальной схеме [3]. Лазерное излучение направляется вдоль оптической оси приемной антенны на основе параболического зеркала с диаметром 2,2 м. Это позволяет сократить теньевую зону до 500 м. В то же время из-за большого фокусного расстояния приемного зеркала (10 м)

действие геометрического фактора таково, что на интервале высот 1–10 км динамический диапазон сигнала снижается примерно в 50 раз, что является весьма благоприятным фактором, так как устраняет опасность перегрузки счетчиков фотонов при регистрации сигналов от низко расположенных слоев атмосферы.

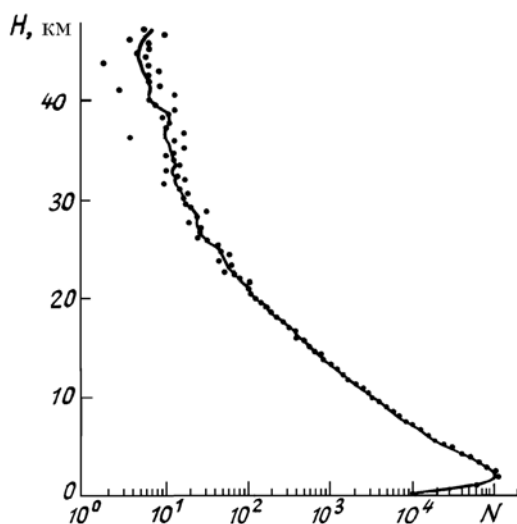


Рис. 1. Профиль эхосигнала для  $J = 6$

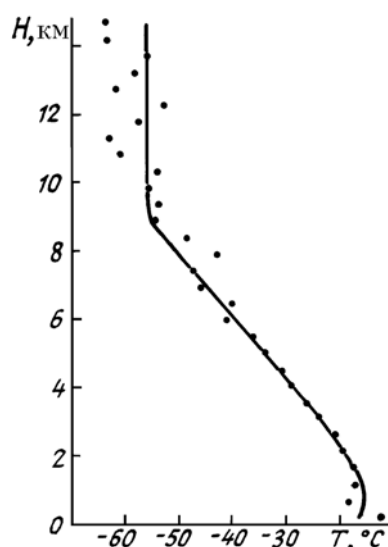


Рис. 2. Профиль температуры: сплошной линией – модельный профиль по ГОСТ 24631-81

Диаграмма направленности приемной антенны имеет ширину  $3 \cdot 10^{-4}$  рад, что обеспечивает высокую пространственную селекцию фона. Двойной монохроматор выделяет два участка спектра, центры которых соответствуют вращательным квантовым числам  $J = 6$  и  $J = 14$ . При этом подавление фона несмещенной частоты составляет около  $10^8$  раз.

В качестве передатчика используется лазер ЛТИ-411 ( $\lambda = 532$  нм;  $E = 50$  мДж;  $f = 14$  Гц).

Профиль эхосигнала СКР канала с  $J = 6$ , полученный 26.12.91 г., изображен на рис. 1. Сигнал прослеживается до высоты около 35 км. Время измерения составило 15 мин, пространственное разрешение 480 м.

На рис. 2 представлен профиль температуры, полученный в соответствии с выражением (4), при этом параметры  $\alpha$  и  $\beta$  уточнялись с помощью модельного профиля по ГОСТ 24631-81. Уточненные величины для  $\alpha$  и  $\beta$  составили  $\alpha = 1042,3$  и  $\beta = -2,436$ . Сравнение показывает хорошее совпадение измеренного профиля с модельным.

На рис. 3 показана зависимость статистической оценки погрешности профиля температуры от высоты. Показано, что до высоты 5 км измерение осуществлялось с метеорологической точностью 0,5 град. Таким образом, экспериментально подтверждены принятые при проектировании станции лазерного зондирования оценки возможности измерения температуры СКР-методикой до высот расположения тропопавузы. При повышении на порядок средней излучаемой мощности лазера, что технически осуществимо, оперативность, пространственное разрешение и точность измерений до высоты 15 км могут быть существенно улучшены. Кроме того, появится возможность оценки температуры на высотах 20÷25 км.

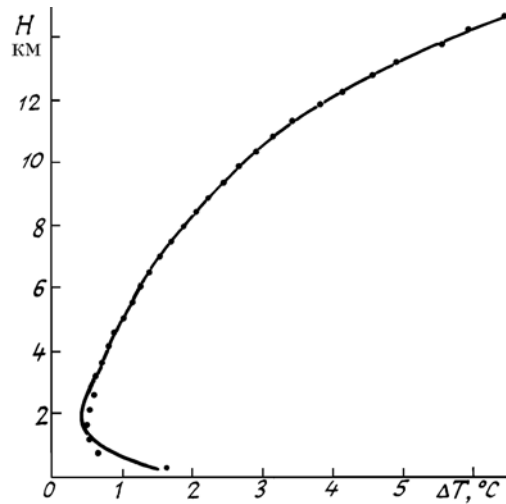


Рис. 3. Профиль оценки статистической погрешности определения температуры от высоты

1. Cohen A., Cooney Y. A. and Geller K. N. //Appl. Opt. 1976. V. 15. № 11. P. 2896.
2. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mitev V. //Appl. Opt. 1983. V. 22. № 19. P. 2984.
3. Кауль Б. В. //Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. № 4. С. 431—438.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
24 марта 1992 г.

**S.N. Volkov, B.N. Kaul, V.A. Shapranov, D.I. Shelefontyuk. Measurements of the Vertical Temperature Profiles with a Raman Lidar Channel of the High-Altitude Lidar Sensing Station.**

Vertical profile of the atmospheric temperature up to 14.5 km has been measured using the ratio of intensities of two portions of pure rotational Raman spectra of molecular nitrogen and oxygen excited by pulsed radiation of the second harmonic Nd : YAG-laser. An estimate of the error of temperature determination as a function of altitude is presented. The experimental results presented in the paper well confirm the assessments of the possibility of acquiring temperature profiles with the Raman-lidar channel made when projecting the construction of the lidar station.