

В.В. Зуев, В.Н. Маричев, С.Л. Бондаренко

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ЛИДАРНЫМ СИГНАЛАМ МОЛЕКУЛЯРНОГО РАССЕЯНИЯ

Проведен анализ точностных характеристик восстановления температуры по реальным лидарным сигналам, полученных при молекулярном рассеянии света. Зондирование температуры проводилось двумя рэлеевскими лидарами: с диаметром зеркала 2,2 м на длине волны 532 нм в верхней стратосфере и мезосфере (30–75 км) и с диаметром зеркала 1 м на длине волны 353 нм в нижней и средней стратосфере (13–35 км). Были проведены оценки общей, случайной и систематической погрешностей расчета температуры и их изменения с высотой, а также девиации профилей температуры в зависимости от погрешностей. Показано, что лидарами обеспечивается достаточная точность измерения температуры в интервалах высот 13–30 и 30–60 км соответственно. Так, стандартная ошибка определения температуры на максимальных высотах в обоих случаях не превышает 10 К. Для ее уменьшения достаточно увеличения времени накопления сигнала. Более радикальная альтернатива – повышение энергетического потенциала лидаров.

Благодаря использованию более короткой длины волны УФ-спектра (353 нм) и учету ослабления сигналов за счет молекулярного рассеяния света был освоен диапазон высот 13–35 км для измерения температуры рэлеевским методом.

Первые лидарные измерения, использующие эффект молекулярного рассеяния света, были применены для исследования структуры атмосферы (измерение плотности атмосферы [1, 2]). В дальнейшем этот же метод был применен для измерения температуры [3].

На Сибирской лидарной станции (Томск, 56.5° с.ш., 85.1° в.д.) первые измерения профилей температуры в верхней стратосфере и мезосфере (30–75 км) были проведены в 1994 г. на лидаре с приемным зеркалом 2,2 м и Nd:YAG-лазере с длиной волны 532 нм [4]. В 1995 г. эти работы были дополнены зондированием температуры в нижней и средней стратосфере в интервале высот 13–35 км на лидаре с приемным зеркалом диаметром 1 м и эксимерным XeCl-лазером, дающим на выходе длину волны 353 нм после ВКР-преобразования в водороде [5]. Отметим, что именно использование длины волны 353 нм позволило освоить диапазон нижних высот, где, как известно, молекулярное рассеяние на коротких длинах волн преобладает над аэрозольным.

Важным вопросом при восстановлении температурных профилей из лидарных сигналов рэлеевского рассеяния является достижение необходимых точностей. Точность восстановления температурного профиля зависит как от самого сигнала, так и от диапазона высот обработки сигнала и априорной информации. В работе приводится анализ ошибки восстановления температурного профиля и его девиации по формуле, полученной нами в [5]:

$$T(H) = \frac{P^2(H)}{N(H) H^2} \left[\frac{N(H_m) H_m^2}{P^2(H_m)} T(H_m) + \frac{1}{R} \int_{H_m}^H \frac{N(h) h^2 g(h)}{P^2(h)} dh \right], \quad (1)$$

где H , H_m – текущая и максимальная высота, с которой принимается достаточно надежный сигнал; $N(H)$ – лидарный сигнал; $P(H)$ – прозрачность молекулярной атмосферы от уровня расположения лидара до высот H ; R – удельная газовая постоянная; g – ускорение свободного падения.

Заметим, что для учета ослабления сигнала, особо заметного при работе в нижних слоях стратосферы, нами была введена функция пропускания $P(H)$. При анализе предполагалось, что случайные шумы лидарного сигнала подчинены пуассоновскому распределению.

Выражение для оценки стандартной ошибки расчета температуры согласно формуле (1) имеет вид

$$\partial T_i = \sqrt{A_i^2 \left(\frac{\partial A_i}{A_i}\right)^2 + B_i^2 \left(\frac{\partial B_i}{B_i}\right)^2}, \quad (2)$$

где A_i, B_i – первое и второе слагаемые в (1), записанные с учетом дискретности приема сигнала по стробам,

$$\left(\frac{\partial A_i}{A_i}\right)^2 = \left(\frac{\partial N_i}{N_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial N_m}{N_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_m}{T_m}\right)^2 = \frac{N_i + F}{N_i^2} + \frac{N_m + F}{N_m^2} + \left(\frac{\partial T_m}{T_m}\right)^2; \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial B_i}{B_i}\right)^2 = \frac{N_i + F}{N_i^2} + \frac{\sum_{j=1}^{m-1} [(N_j + F)^{3/2} H_j^2 / N_j]^2}{\left[\sum_{j=1}^{m-1} N_j H_j^2\right]^2}. \quad (4)$$

В (3), (4) F – суммарный шум, вызванный фоном и темновым током. Ошибка в выборе значения температуры на максимальной высоте была определена как $\partial T_m / T_m = 0,1$.

На рис. 1 представлены результаты исследования точностных характеристик восстановления температуры из реальных сигналов на длине волны 532 нм на примере данных за 11.05.95 (время накопления 60 мин).

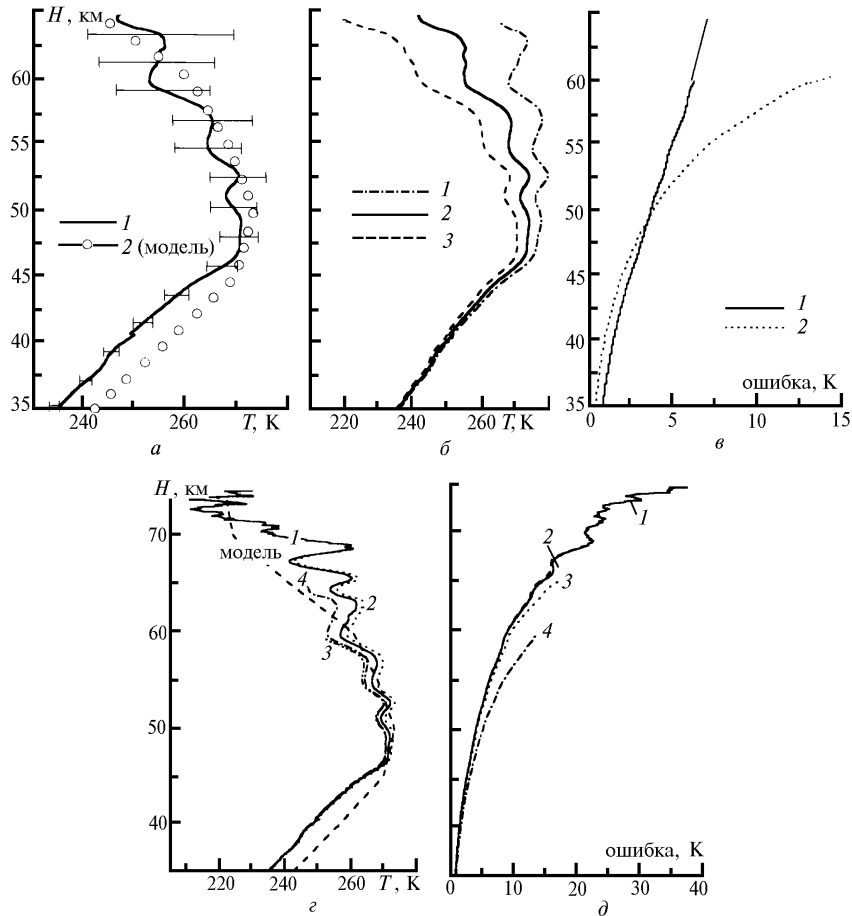


Рис. 1. Результаты анализа ошибок восстановления профиля температуры по лидарным сигналам на длине волны 532 нм

На рис. 1, *а* показаны лидарный 1 и модельный 2 профили температуры и соответствующие стандартные ошибки расчета температуры. Отклонения температурного профиля за счет ошибки выбора температуры на максимальной высоте демонстрируются на рис. 1, *б*. Здесь

была выбрана максимальная высота 70 км и посчитаны три профиля для значений заданной модельной температуры $T_0(H)$ (кривая 2), $1,1T_0(H)$ (кривая 1), $0,9T_0(H)$ (кривая 3). Вклад случайной (шумы сигнала) и систематической (неправильный выбор температуры на максимальной высоте) ошибок показан на рис. 1, в. Здесь представлены квадратные корни случайной 1 и систематической 2 дисперсией. Видно, что основной вклад в общую ошибку в интервале высот 50–60 км вносится систематической ошибкой, ниже вклад случайной ошибки становится чуть заметнее. Зависимость восстановления температурного профиля от выбора максимальной высоты, с которой принимаются сигналы, демонстрируется на рис. 1, г. Здесь были выбраны максимальные высоты 80, 75 и 70 км, для которых были получены температурные профили от высот 75 (1), 70 (2) и 65 км (3). Замечено, что ошибка, обусловленная выбором для расчета максимальной высоты, лежит в пределах 8 К на 65 км и очень быстро падает с ростом высоты. На рис. 1, д приведены профили ошибок для случаев обработки сигналов с высот 80 (1), 75 (2), 70 (3) и 65 км (4). Видно, что с уменьшением максимальной высоты обработки происходит некоторое увеличение ошибки, что объясняется потерей полезного сигнала. На высоте 60 км ошибка составляет 10 К, а на высоте 35 км не превышает 1 К.

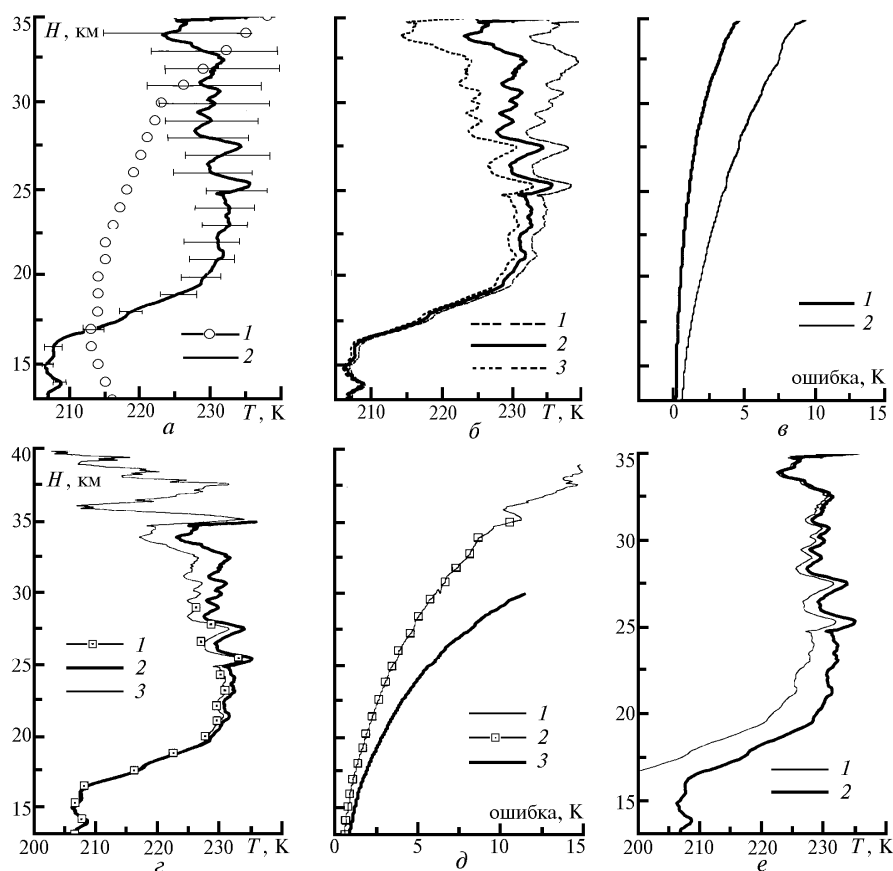


Рис. 2. Результаты анализа ошибок восстановления профиля температуры по лидарным сигналам на длине волны 353 нм

На рис. 2 приведены результаты анализа ошибок восстановления профиля температуры по лидарным сигналам, полученным на длине волны 353 нм за 24.05.96 (время накопления – 40 мин). Рис. 2 выполнен по схеме, аналогичной рис. 1. Так, на рис. 2, а показан рассчитанный в интервале высот 13–35 км профиль температуры и соответствующие значения стандартной ошибки. Последняя изменяется следующим образом: ± 1 К на высоте 15 км, ± 2 К на высоте 20, ± 4 К на высоте 25 и ± 8 К на высоте 30 км. Девиация профиля температуры за счет произвольного задания температуры в точке H_m приведена на рис. 2, б. Здесь нейтральный профиль соответствует значению $T = T_m$, левый – $T = 0,9T_m$ и правый – $T = 1,1T_m$. Вклад указанной погрешности наиболее заметен в верхнем слое 30–35 км, на высоте 30 км он составляет ± 5 К.

Поэтому рекомендуется представлять профиль температуры на ~5 км ниже максимальной высоты, с которой начинается процедура расчета. Вклад систематической (кривая 2) и случайной (кривая 1) ошибок в общую погрешность иллюстрируется рис. 2, в. Здесь во всем интервале высот наблюдается преобладание систематической ошибки над случайной. Соответствующие значения систематической и случайной ошибок на высоте 30 км составляют ± 5 и ± 2 К; с уменьшением высоты заметен быстрый спад ошибок практически до нулевого значения на высоте 13 км. Далее на рис. 2, з показано влияние выбора максимальной высоты, с которой начинается расчет температуры, на девиацию восстановленного профиля. Максимальные высоты составляют 45, 40 и 35 км; соответствующие профили температуры показаны на рисунке с высот 40 (кривая 3), 35 (кривая 2) и 30 км (кривая 1).

Как следует из рис. 2, расхождение профилей незначительное и становится заметным выше 30 км (≤ 3 К). Аналогичное представление, только для профилей ошибок, дано на рис. 2, д. Как и в случае с сигналами на длине волны 532 нм (рис. 1, в), отклонения профиля ошибок при расчете с высоты 35 км (кривая 3) в сторону больших значений можно объяснить потерей полезной информации (неиспользование сигнала в интервале высот 35–45 км). На последнем рис. 2, е приведены профили температуры, рассчитанные без учета (кривая 1) и с учетом молекулярного рассеяния света (кривая 2). Видно, что коррекция на молекулярном рассеянии света необходима, начиная с высот ниже 30 км. На высоте 20 км отклонение составляет 7 К, которое быстро увеличивается со спадом высоты.

Таким образом, приведенный анализ точностных характеристик восстановления температуры из реальных лидарных сигналов показал достаточную точность измерения температуры лидаром на длине волны 532 нм в диапазоне высот 30–60 км и лидаром на длине волны 353 нм в диапазоне высот 13–30 км. Для достижения больших точностей или повышения дальности зондирования достаточно увеличения времени накопления лидарного сигнала. Более радикальной альтернативой является повышение энергетического потенциала лидара.

Использование более короткой длины волны в УФ-спектре (353 нм) с коррекцией на ослабление сигнала за счет молекулярного рассеяния света позволило освоить диапазон высот 13–35 км.

Работа выполнена на установке «Сибирская лидарная станция» при финансовой поддержке Министерства науки России (рег. N 01-64).

1. Mc Cormick P.D., Silverberg E.C., Poultney S.K. et al. // Nature. 1967. N 215. P. 1262–1263.
2. Sandford M.C.W. // J. Atmos. Terr. Phys. 1967. N 29. P. 1657–1662.
3. Nauchecorne A., Chanin M.-L. // Geoph. Res. Lett. 1980. V. 7. N 8. P. 565–568.
4. Бондаренко С.Л., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 11–12. С. 1652–1655.
5. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л., Долгий С.И., Шарабарин Е.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1386–1393.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
19 июля 1996 г.

V.V. Zuev, V.N. Marichev, S.L. Bondarenko. Study of Accuracy Characteristics in Temperature Profiles Reconstructing from Lidar Pulses of Molecular Light Scattering.

An analysis of accuracy characteristics of the temperature reconstructing from realistic lidar pulses obtained at the molecular light scattering is presented. The temperature was measured by means of two Rayleigh lidars: one with 2,2 m diameter mirror at $\lambda = 532$ nm in the upper stratosphere and mesosphere (30–75 km) and another with 1 m diameter at $\lambda = 353$ nm in the lower and middle stratosphere (13–35 km). General, random, and systematic errors of the temperature computation and their dependence on the altitude were estimated as well as the temperature profiles deviations depending on the errors. The lidars are shown to provide enough accuracy of the temperature measurement within altitude ranges from 13 to 30 km and from 30 to 60 km. The standard error at maximum altitudes in both cases does not exceed 10 K. To decrease it, will suffice to increase the time of the pulses accumulation. More drastic alternative is the increase of the lidars energy potentiality.

Due to the use of shorter wavelength of UV range (353 nm) and taking into account the pulses attenuation caused by the molecular light scattering, the altitude range from 13 to 35 km was mastered by us for the temperature measuring by the Rayleigh method.