

# ЛИДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ОБЛАКОВ ВЕРХНИХ ЯРУСОВ В Г. ТОМСКЕ

Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Насонов С.В., Пеннер И.Э.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

kokh@iao.ru, balin@iao.ru, nasonov@ penner@iao.ru

В докладе приводятся данные лидарных наблюдений облачности верхних ярусов в Томске в 2011-2017 годах. Наблюдения проводились на многоволновом лидаре ЛОЗА-С, одновременно регистрировались сигналы упругого рассеяния (355 и 532 нм) и сигналы комбинационного рассеяния в колебательной Q-полосе (387 и 607 нм). Приводятся примеры лидарных записей, рассмотрена методика определения оптической толщины облачного слоя и возможные источники погрешностей расчетов.

Перистые облака покрывают значительную часть земной поверхности и поэтому, несмотря на малую оптическую толщину, оказывают значительное влияние на радиационный баланс и климат прежде всего из-за эффектов ослабления и отражения излучения [1]. Эти облака, также как и облака среднего (высота 3-6 км) яруса, часто имеют небольшую плотность и частично прозрачны для солнечного излучения. Это дает возможность для определения оптической толщины облаков на разных длинах волн  $\tau(\lambda)$  как по данным солнечного фотометра, так и по лидарным измерениям.

Регулярное лидарное зондирование проводится в Томске, Академгородок, с помощью многоволнового аэрозольно-рамановского лидара ЛОЗА-С [2]. В ночное время кроме сигналов упругого рассеяния (УР) на длинах волн 355, 532 и 1064 нм проводится регистрация сигналов комбинационного (рамановского) рассеяния (КР) в колебательных Q-полосах 387 и 607 нм в счетно-фотонном режиме. Для анализа оптической толщины наблюдавшихся облаков в этой работе мы привлекли только данные одновременной регистрации сигналов упругого и рамановского рассеяния. При этом учитывалось, что для определения  $\tau$  лидар должен регистрировать сигнал как под облаком, так и выше него с достаточной для обработки интенсивностью.

Запишем лидарное уравнение для сигнала УР в упрощенном виде:

$$S_{532}(z) \equiv I(z) z^2 = C(\beta_{\pi}^a)(z) T_{532}^2(z), \quad T_{532} = \exp(-\tau_{532}) \quad (1)$$

где  $I(z)$  – лидарный сигнал с расстояния  $z$ ,  $\beta^{\pi}$  – коэффициент обратного рассеяния,  $T(z)$  – пропускание слоя атмосферы до высоты  $z$ ,  $C$  – константа.

Для сигналов рамановского рассеяния

$$S_{607}(z) = C \beta_{\pi}^{molec} T_{532}^{molec} T_{607}^{molec} T_{532}^{aer} T_{607}^{aer} = C M_{\Sigma}^{molec} T_{\Sigma}^2 . \quad (2)$$

Здесь обозначено  $M_{\Sigma}^{molec} = \beta_{\pi}^{molec} T_{532}^{molec} T_{607}^{molec}$  - величина, относящаяся к молекулярному рассеянию, и  $T_{\Sigma} = T_{532}^{aer} T_{607}^{aer} = \exp(-\tau_{\Sigma})$ ,  $\tau_{\Sigma} = \tau_{532}^{aer} + \tau_{607}^{aer}$  - полное пропускание при учете аэрозольного ослабления. Также учтено, что излучение вперед распространяется на длине волны  $\lambda=532$  нм, а обратно – на  $\lambda=607$  нм. Величина  $M_{\Sigma}^{molec}$  может быть рассчитана, учитывая, что коэффициент молекулярного рассеяния, и рамановского и упругого, пропорционален плотности атмосферы:  $\beta_{\pi}^{molec} \propto \rho_{atm}$ . При стандартных условиях ( $T=288.15$  К,  $p=1013.25$  мбар)

$$\beta_{\pi}^{molec} = 1.39 \frac{550}{\lambda^4} \text{ m}^{-1} \text{sr}^{-1} [3], \text{ молекулярный коэффициент ослабления } \varepsilon^{molec} [m^{-1}] = \frac{8\pi}{3} \beta_{\pi}^{molec} [m^{-1} \text{sr}^{-1}]$$

и высотный профиль  $\beta_{\pi}^{molec}$  можно пересчитать исходя из стандартного значения, рассчитав плотность атмосферы при известном профиле давления и температуры [4]:

$$\rho_{atm} [kg / m^3] = \frac{p [mbar]}{2.87 \cdot T [K]} . \quad (3)$$

На рис. 1 приведена запись облаков верхнего яруса, сделанная 2.06.2017 г. Условная цветовая шкала на рис. 1а выражена в единицах отношения рассеяния  $S.R. = \beta_{\pi}^a / (\beta_{\pi}^m + \beta_{\pi}^a)$  (отношение аэрозольного коэффициента обратного рассеяния к полному). Внизу приведены лидарные сигналы КР 607 нм (рис. 1б) и УР 532 нм (рис. 1в), суммированные за интервал времени в один час. Облачный слой занимает высоты от  $z_1=6500$ м до  $z_2=9500$ м.

Измеренное отношение сигналов  $S(z)$  на высотах  $z_1$  и  $z_2$  позволяет определить отношение аэрозольного пропускания слоев атмосферы

$$R = \frac{S_{607}(z_1)}{S_{607}(z_2)} = \frac{M_{\Sigma}^{molec}(z_1) T_{\Sigma}^2(z_1)}{M_{\Sigma}^{molec}(z_2) T_{\Sigma}^2(z_2)}, \quad \frac{T_{\Sigma}^2(z_1)}{T_{\Sigma}^2(z_2)} = \frac{S_{607}(z_1) M_{\Sigma}^{molec}(z_2)}{S_{607}(z_2) M_{\Sigma}^{molec}(z_1)}, \quad (4)$$

а затем рассчитать аэрозольную оптическую толщину слоя:

$$\tau_{\Sigma}^{aer} \Big|_{z_1}^{z_2} = \ln \left( \frac{T_{\Sigma}^2(z_2)}{T_{\Sigma}^2(z_1)} \right) = \int_{z_1}^{z_2} \left( \varepsilon_{532}^{aer}(z) + \varepsilon_{607}^{aer}(z) \right) dz . \quad (5)$$

Процедура измерения оптической толщи по сигналам рамановского рассеяния представлена на рис 1б. Значение константы  $C$  определялось по минимизации отклонения рассчитанной величины  $M_{\Sigma}^{molec}$  от измеренного сигнала рамановского рассеяния на интервале расстояний  $\Delta z=1$ км ниже  $z_1$  и  $\Delta z=2$  км выше  $z_2$  методом наименьших квадратов (интервалы

представлены жирной линией). Величина  $R$  -отношение между рассчитанным  $M_{\Sigma}^{molec}$  и измеренным на высоте  $z_2$  выше облачного слоя – равна  $R = 2.71$ , что соответствует значению  $\tau_{\Sigma} = 1.0$ .

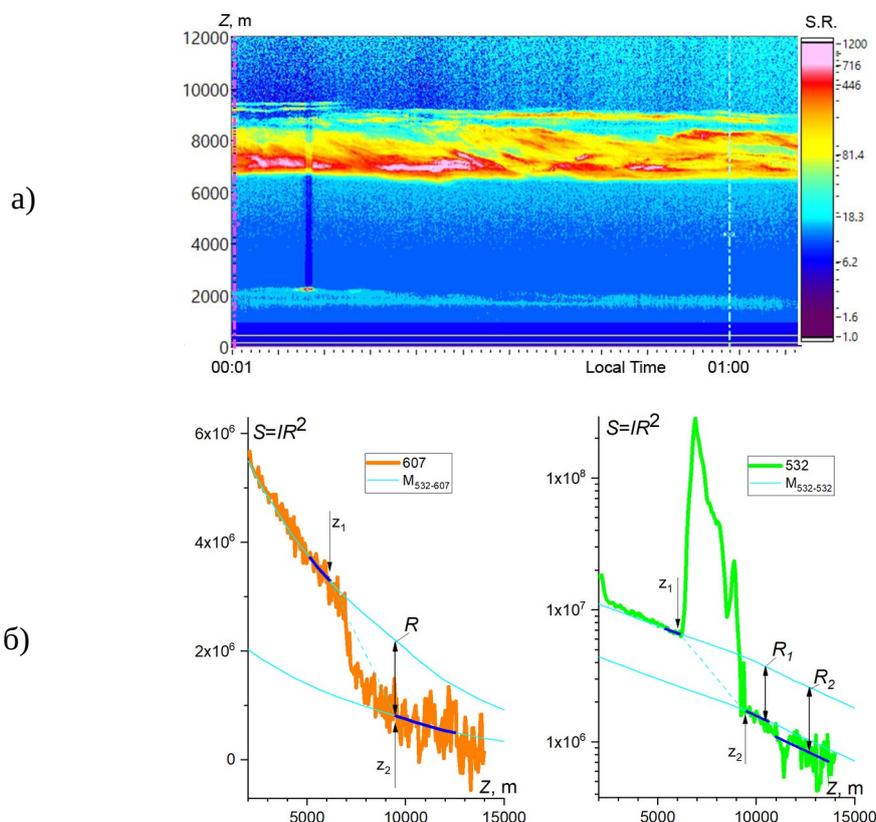


Рисунок 1 – Зондирование 2 июня 2017 г. а) цветная карта зондирования; б) лидарные сигналы для комбинационного рассеяния (607 нм); сигналы упругого рассеяния (532 нм).

На рис.1б показана та же процедура для сигналов УР 532 нм. Здесь заметно присутствие надоблачного слоя на высоте 9.5-10.5 км, что приводит к неоднозначному определению оптической толщи. Значения  $R_1 = 2.52$ ,  $\tau_{\Sigma} = 0.92$ ;  $R_2 = 2.98$ ,  $\tau_{\Sigma} = 1.09$ .

Рассмотрим погрешности определения оптической толщи.

Первая, наиболее очевидная причина ошибок – погрешности измерения уровня сигналов, особенно на высотах выше облачного слоя. Поскольку  $\tau \propto \ln S$ , погрешность  $\Delta(\tau) = \Delta(\ln S) = \Delta S/S$ . Для представленного на рис. 1б сигнала КР относительное среднеквадратическое отклонение сигнальных отсчетов, рассчитанное по интервалу 10-12 км (33 строка) составляет  $\Delta(S)/S = 0.37$ , соответственно  $\Delta\tau = 0.37$ . При измерениях эта ошибка может быть уменьшена увеличением времени накопления отсчетов либо увеличением мощности лазера и площади приемного зеркала.

Вторая причина возникновения ошибки – неточный расчет молекулярного рассеяния. При возможности мы использовали для расчета  $\rho_{atm}$  данные радиозондов, запускаемых с территории Академгородка во время измерений. При отсутствии таких данных приходится использовать данные с ближайших аэрологических станций, доступные на [http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding\\_legacy.html](http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html) – это либо Новосибирск, либо Колпашево. Кроме большого расстояния до станций, плохо то, что измерения на них проводятся только два раза в сутки – в 00 и 12 часов по Гринвичу. Сравнение измеренных профилей метеовеличин показывает, что использование данных от этих станций может привести к погрешностям вычисления плотности атмосферы до 10% и, следовательно, погрешностям  $\Delta\tau \approx 0.1$ .

Всего нами рассмотрены 18 случаев наблюдения облачных слоев при одновременной регистрации упругого и рамановского рассеяния. Нижняя граница облачности находилась в пределах 3.3 – 10.5 км. Сравнение значений аэрозольной оптической толщи, полученных из сигналов рамановского (ось X) и упругого (ось Y) рассеяния приведено на рисунке 2. Красная линия – ортогональная регрессия для данных измерений.

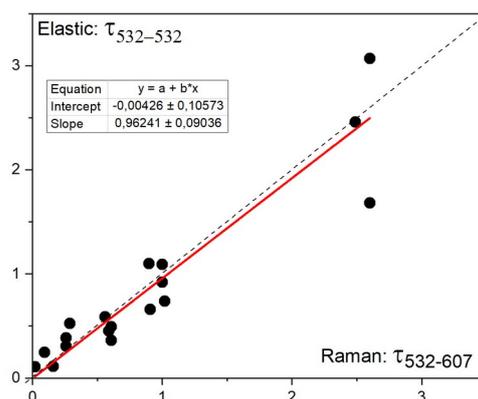


Рисунок 2. Сравнение результатов измерения оптических толщин облаков по сигналам комбинационного и упругого рассеяния.

Сравнение показывает, что, несмотря на наблюдаемое иногда значительное отличие (до  $\Delta\tau \approx 0.5$ ) результатов измерения  $\tau$  по сигналам упругого рассеяния от более надежных рамановских данных, между ними существует надежная статистическая связь, что позволяет использовать доступные и в дневное время измерения упругого рассеяния (532 или 355 нм) для оценки оптических толщин облаков верхних ярусов.

Работа выполнялась в рамках госзадания ИОА СО РАН.

1. Voigt A., Albern N., Ceppi P., Grise K., Li Y., Medeiros B. Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present-day climate and under climate change // WIREs Clim. Change. 2021. V. 12. P. e694.

2. *Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Насонов С.В., Самойлова С.В.* «ЛОЗА-С» - базовый лидар российского сегмента лидарных станций сети СНГ (CIS LiNet) // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. №12. С.1065-1068
3. *Kovalev V.A., Eichinger W.E.* Elastic lidar. New Jersey: J.Willey & Sons, Inc. 615 с.
4. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 752 с.