

Анализ потенциальных возможностей лидарных измерений плотности воздуха в средней атмосфере

МАРИЧЕВ В.Н.^{1,2}, БОЧКОВСКИЙ Д.А.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

Плотность воздуха, наравне с температурой, давлением и влажностью, является одной из основной метеорологических характеристик атмосферы. В атмосфере она испытывает экспоненциальное убывание с высотой. На всех высотных уровнях средней атмосферы (20-80 км) наблюдается выраженный сезонный ход среднемесячных значений плотности с максимальными значениями летом и минимальными зимой для северного полушария. Для южного полушария такой ход противоположный. Амплитуда годового колебания увеличивается с широтой и нарастает с высотой. В вышеизложенном материале мы кратко привели некие средние значения изменения плотности воздуха средней атмосферы с широтой, высотой и месяцами года согласно модельному представлению CIRA-86. В реальности плотность воздуха атмосферы за счет воздействия быстродействующих и мелкомасштабных процессов подвержена значительным пространственно-временным колебаниям (включая суточные), и ее истинные значения будут существенно отличаться от модельных.

Для решения отдельных научных и прикладных задач необходима оперативная информация о реальном высотном распределении плотности атмосферы. Преимущественно она нужна при проведении посадок космических аппаратов (КА).

Нами предлагается рассмотреть вариант применения лидарных методов и средств зондирования атмосферы. Развитие лидарных технологий привело к их широкому использованию для исследования состава и свойств средней атмосферы как за рубежом, так и у нас в стране. В мировом масштабе лучшая лидарная техника сосредоточена на сети лидарных обсерваторий NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>) . Более чем на двадцати станциях этой сети проводятся регулярные наблюдения стратосферного и тропосферного озона, температуры, аэрозоля и стратосферных облаков. В России подобные лидарные исследования выполняются на лидарных станциях институтов РАН в Томске, Якутске, Петропавловск-Камчатском и Владивостоке. На них также наблюдаются озон, температура и аэрозоль в стратосфере и мезосфере[1-3]. Однако, целенаправленных и систематических исследований особенностей изменения плотности атмосферы, нет. Целью настоящей работы является проведение на первом этапе оценки потенциальных возможностей лидарных измерений плотности воздуха в средней и верхней атмосфере при зондировании с Земли, самолета и с космического аппарата.

Формулы для расчета плотности и стандартного отклонения

При условии зондирования атмосферы, начиная с высот 20 и более км, плотность атмосферы ρ связана с молекулярным коэффициентом обратного рассеяния и лидарным сигналом определенными константами:

$$\rho(H) = const_1 * \beta_{\pi M}(H) = const_2 * \frac{N_L(H)}{H^2} \quad (1)$$

В данном случае предполагается, что пропускание слоя атмосферы выше 20 км равно 1, а все ослабление излучения происходит ниже уровня 20 км и величина $T_M^2(H)$, $T_a^2(H)$ является константой и входит в $const_2$. Значение $const_2$ может быть определено при калибровке на определенной высоте, для которой известна величина плотности. Тогда профиль плотности атмосферы можно вычислить по простой формуле:

$$\rho(H) = \frac{N_{\text{Л}}(H) * H^2}{N_{\text{Л}}(H_k) * H_k^2} * \rho(H_k) \quad (2)$$

где H_k - высота калибровки.

Среднеквадратичная ошибка измерений определится статистикой Пуассона, свойственной для лидарных сигналов, и будет равна:

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(H) = \left\{ \frac{N_{\text{Л}}(H_k) + N_{\phi} + N_T}{[N_{\text{Л}}(H_k)]^2} + \frac{N_{\text{Л}}(H) + N_{\phi} + N_T}{[N_{\text{Л}}(H)]^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Исходные данные

Расчеты лидарных сигналов проводились для двух апертур с диаметрами 0.3 и 0.5 м и излучения на длине волны 532 нм в интервале высот 20-100 км при следующих входных параметрах:

$$\begin{aligned} \eta = 0.1 \quad E_0 = 0.8 \text{ Дж} \quad hv = 3.736 * 10^{-19} \text{ Дж} \quad T_{\text{анн}} = 0.2 \\ T_M^2(H) * T_a^2(H) = 0.34 \quad \Delta H = 1 \quad f = 20 \text{ Гц} \quad \Delta t = 600 \text{ с} \end{aligned}$$

Обратный коэффициент молекулярного рассеяния вычислялся через объемный коэффициент релеевского рассеяния β_g по формуле: $\beta_{\text{мп}} = \frac{1.5 * \beta_g}{4 * \pi}$ Вертикальное распределение β_g бралось из модели.

Значения фонового сигнала рассчитывалось для $T^{\text{апц,пр}} = 0.3$ при трех значениях ширин интерференционных фильтров и двух полей зрения приемного телескопа:

$$\Delta\lambda_1 = 0.5 \text{ нм} \quad \Delta\lambda_2 = 1 \text{ нм} \quad \Delta\lambda_3 = 10 \text{ нм}$$

$$\gamma_1 = 1 \text{ мрад} \quad \gamma_2 = 0.1 \text{ мрад}$$

Рассматривались пять значений яркости неба, от дневных до сумеречных засветок, взятых из, до ночного времени:

$$B_{z1} \div B_{z6} [\text{вт.см}^{-2} * \text{стер.мкм}^{-1}]$$

При расчете темновой компоненты шума скорость поступления темновых фотоимпульсов задавалось величиной $f_T = 50 \text{ имп} * \text{с}^{-1}$.

Наконец, калибровка проводилась на высоте 20 км, где значение плотности атмосферы по модели равнялась 8.7 г/м^3 .

Зондирование с уровня Земли

На рис. 1 приведены графики изменения среднеквадратичного отклонения лидарных измерений плотности атмосферы с уровня Земли при точности 10% для разных полей зрения с ширинами светофильтров 10, 5, 2, 1 и 0.5 нм.

Видно, что при поле зрения 1 мрад и радиусу зеркала 0.3 м при дневных условиях достижимо измерение плотности атмосферы с приемлемой точностью (10%) до высот 35 – 42 км в зависимости от ширины светофильтров. Для сумеречных условиях потолок увеличивается до высот 55-60 км и ночью может достигать более 70 км.

Точностные характеристики значительно улучшаются при более узком поле зрения 0.1 мрад, которое, в силу сложности его реализации в приемопередатчике лидара, следует

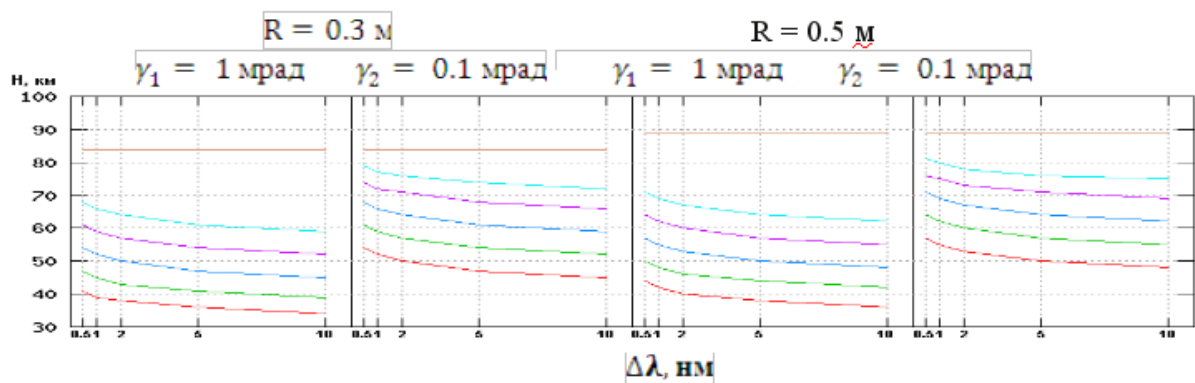


Рис. 1. Графики изменения среднеквадратичного отклонения лидарных измерений плотности атмосферы с уровня Земли при точности 10%

считать предельным. Днем уровень 10% погрешности отмечается на высотах 50-57 км, в сумерках – на 55-70 км и ночью до высот 80 км.

При поле зрения 1мрад и радиусу зеркала 0.5 м измерения плотности атмосферы на уровне 10% можно проводить до высот 40-45км, в сумерках – от 45 до 60 км и ночью до 75-80 км. Для поля зрения 0.1мрад соответствующие показатели следующие: день – 50-60км, сумерки – 60-70 км, ночь – 70 -80 км.

Зондирование с борта самолета

При зондировании с борта самолета предполагался полет на высоте 10 км. По сравнению с зондированием с уровнем Земли с высоты 10 км уровень фоновых засветок сокращался примерно в 4 раза, а ослабление сигнала за счет исключения двойного прохождения лучом слоя атмосферы 0-10 км уменьшалось в 10 раз. Указанные обстоятельства показывают преимущества самолетных измерений.

Результаты расчета, выполненные для тех же параметров лидара, как при измерениях с уровня Земли, приведены на рис.2. При диаметре зеркала 0.3 м, потолок зондирования на уровне 10% погрешности для дневных условий возрос до 40-50 км., для сумеречных до 50- 60 км и ночью до 55-70 км при измерениях на светофильтрах с спектральными ширинами 10 и 0,5 нм и полем зрения 1мрад. Соответствующие показатели составили 55-65 км, 60-70 км и 70-80 км для поля зрения 0.1мрад. При приеме сигналов зеркалом с диаметром 0.5м высота 10%-го уровня погрешности увеличилась, но не существенно. Для поля зрения 1мрад она возросла примерно на 5 км по сравнению с зеркалом диаметра 0.3 м для дневных, сумеречных и ночных условий наблюдений. Предельные точностные характеристики измерений достигаются при наиболее узком поле зрения 0.1мрад. Днем при стандартном отклонении 10% доступны высоты до 65 км, в сумерки – до 75 км и ночью – до 85 км.

Зондирование с борта космического аппарата

Данный вариант предполагает измерения плотности атмосферы лидаром, установленным на сегменте МКС с высотой орбиты вращения 414 км. Преимуществом зондирования из космоса является увеличение сигнала пропорционально плотности воздуха по экспоненциальной зависимости по мере его вхождения в атмосферу, а недостатком – большое расстояние, квадрат которого приводит к значительному уменьшению лидарного сигнала.

На рис. 3 приведены точностные характеристики измерений космическим лидаром с радиусом приемного зеркала 0.3 м и 0.5 м. Из графиков отчетливо видно, что они значи-

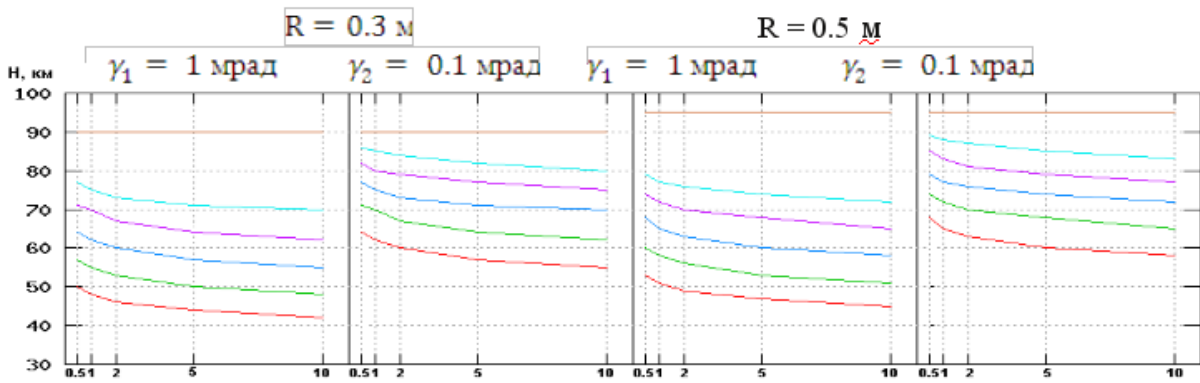


Рис. 2. Графики изменения среднеквадратичного отклонения лидарных измерений плотности атмосферы с борта самолета при точности 10%

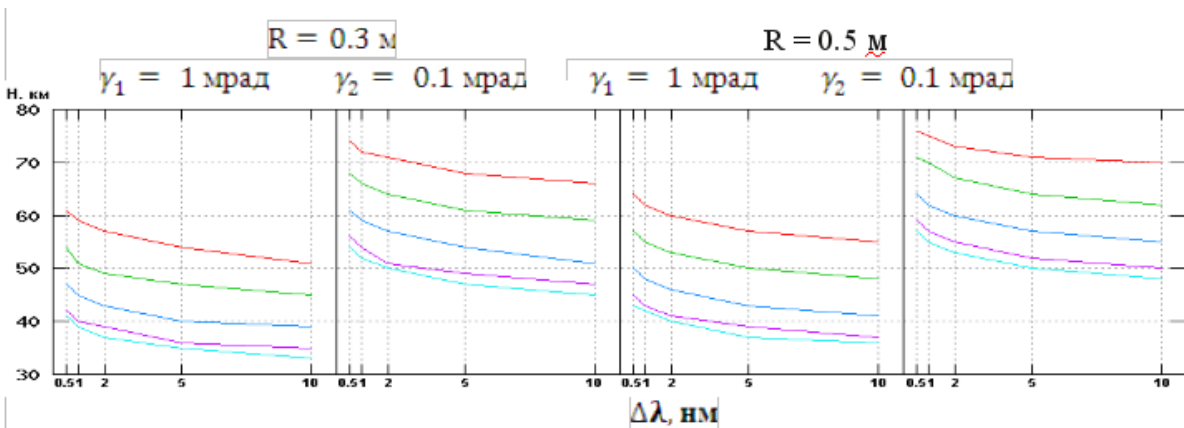


Рис. 3. Графики изменения среднеквадратичного отклонения лидарных измерений плотности атмосферы с борта космического аппарата при точности 10%

тельно хуже по сравнению с наземным и самолетным зондированием. Вместе с тем заметно, что их разброс между наблюдениями днем и ночью значительно сократился примерно до интервала 10 км. В зависимости от спектральной ширины светофильтра при поле зрения 1 мрад наблюдения с погрешностью 10% днем можно проводить до высот 33-40 км, ночью – до 45-55 км. Для поля зрения 0.1 мрад эти показатели заметно улучшаются и охватывают диапазоны высот 45-55 км и 57-67 км.

Заключение

Из анализа потенциальных возможностей лидарных измерений плотности атмосферы на основе числовых результатов расчета выявлено очевидное преимущество зондирования с борта самолета. Последнее достигается за счет исключения двойного прохождения луча наиболее сильно рассеивающего нижнего слоя 0-10км, квадрат прозрачности которого составляет около 0.1, и уменьшения фоновых засветок в 4 раза. Показано, что при достаточно умеренных параметрах лидара с приемной апертурой радиуса 0.3-0.5, Nd: YAG-лазера с энергией импульса 0.8 Дж на длине волны 532 нм, частотой посылок 20 Гц, при реальных полях зрения приемной системы 0.1-1 мрад, спектральных ширинах светофильтров 0.5-10 нм, и небольшим временем накопления сигнала 10мин. на уровне стандартного отклонения 10% для самолетного варианта достижимы высоты : 40-65 км – днем, 50-70 – в сумерках, 55-80 –ночью. При наблюдениях из космоса за счет большого удаления космического аппарата от объекта зондирования подобные показатели самые низкие:33-55 км – день, 45-67 – ночь. При наземных измерениях диапазоны достижимых высот занимают промежуточное положение.

Литература

1. *Маричев В.Н.* Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008-2010 гг. // Оптика атмосферы и океана. -2011. -Т. 24. -№ 5. -С.386-391.
2. *Маричев В.Н., Самохвалов И.В.* Лидарные наблюдения аэрозольных вулканических слоев в стратосфере Западной Сибири в 2008-2010гг. // Оптика атмосферы и океана. -2011. -Т. 24. -№ 03. -С.224-231.
3. *Бычков В.В., Шевцов Б.М., Маричев В.Н.* Некоторые среднестатистические характеристики появления аэрозольного рассеяния в средней атмосфере Камчатки. // Оптика атмосф. и океана. -2012. -Т. 25. -№8. -С.868-870.

Analysis of potential capabilities of lidar measurements of air density in the middle atmosphere

Marichev V.N., Bochkovsky D.A.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Russia

In the present paper, the potential capabilities of lidar measurements of the atmospheric density in the middle atmosphere are analyzed. Calculations are performed for the lidar with quite moderate specifications: transmitter comprising a solid Nd: YAG-laser with a wavelength of 532 nm, pulse energy of 0.8 J, and repetition frequency of 20 Hz and receiving system comprising primary mirrors with radii of 0.3 and 0.5 m, field-of-view angles of 0.1 and 1 mrad, and spectral widths of the filter of 0.5, 1, and 10 nm. The signal acquisition time is 10 min for spatial resolution of 1 km. Three sensing options are analyzed: from the ground level, from

an aircraft (with 10-km flight altitude), and from an ISS with orbit altitude of 414 km. It is demonstrated that for a standard deviation of 10%, maximum sensing altitudes of 40-65km can be reached in the daytime, 50-70 km in the twilight, and 55-80 km at night for the best option - aircraft observations. For observations from space, maximum sensing altitudes are the lowest ones: 33-55 km in the daytime and 45-67 km at night due to large distances from the space vehicle to the object being sensed. For ground-based measurements, the maximum sensing altitudes lie between these values.