

Лидарные измерения плотности воздуха в средней атмосфере. Моделирование потенциальных возможностей в УФ-области спектра.

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

В предыдущей работе [1] нами были сделаны оценки потенциальных возможностей лидарного зондирования плотности воздуха в средней атмосфере в видимом диапазоне длин волн. В качестве передатчика был выбран традиционный по применению в лидарах твердотельный Nd:YAG – лазер с излучением на второй гармонике 532нм. Преимущество зондирования атмосферы в видимом спектральном диапазоне состоит в более высокой энергии излучения на 2-ой гармонике по сравнению с гармониками более высокого порядка и более простой и доступной юстировки приемо-передающего тракта лидара. Рассматривались варианты зондирования с Земли, самолета и из космоса. Расчеты проведены при следующих исходных данных: передатчик с энергией импульса 0.8Дж, частотой посылок 20Гц. Приемная система: главное зеркало радиусом 0.3 и 0.5м, поле зрения 0.1 и 1 мрад, спектральная ширина светофильтра – 0.5, 1 и 10нм. Время накопления сигнала – 10мин при пространственном разрешении 1км. Было показано, что на уровне стандартного отклонения 10% для наилучшего варианта - самолетного достижимы высоты : 40-65км – 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: 33-55км – день, 45-67 – ночь. При наземных измерениях диапазоны достижимых высот занимают промежуточное положение.

В плане дальнейшего развития данной тематики ниже предлагаются исследования возможностей лидарного зондирования плотности атмосферы в УФ-диапазоне длин волн. Этот диапазон интересен тем, что в нем происходит более сильное взаимодействие излучения с молекулярной атмосферой как рассеивающей средой пропорционально четвертой степени отношения длин видимой и ультрафиолетовой длин волн. Для выбранных длин волн – это третья и четвертая гармоника Nd:YAG –лазера 353 и 266нм усиление взаимодействия, в данном случае рассеяния, будет в 5.16 и 16 раз больше по сравнению с 532нм.. Следовательно, во столько же раз будут больше лидарные сигналы (сигналы обратнорассеянного света). Но вместе с тем нужно учитывать, что и молекулярное ослабление лидарных сигналов УФ-диапазоне за счет молекулярного рассеяния будет больше, а для излучения на длине волны 266нм будет сказываться также поглощение озоном.

В первую очередь УФ- диапазон длин волн был рассмотрен нами с целью усиления эффективности измерений из космоса. Расчеты погрешностей лидарных измерений плотности атмосферы проводились по методике и формулам, приведенных в [1].

Зондирование на длине волны 353 нм

Расчеты лидарных сигналов проводились для двух апертур с диаметрами 0.3 и 0.5 м в интервале высот 20-100 км при следующих входных параметрах: квантовая эффективность фотоприемника $\eta = 0.2$, энергия лазерного импульса $E_0 = 0.4$ Дж, энергия фотона на длине волны 353 нм $h\nu = 5.63 \times 10^{-19}$ Дж пропускание приемопередающего тракта $T_{ann} = 0.2$, пространственное разрешение $\Delta H = 1$, частота посылки импульсов $f = 20$ Гц, время накопления сигнала $\Delta t = 60$ с. Лидар установлен на борту МКС с радиусом высоты орбиты вращения 414 км.

Значения фонового сигнала рассчитывалось для пропускания приемной системы $T_{\text{апп,пз}} = 0.3$ при трех значениях ширин интерференционных фильтров и двух полей зрения приемного телескопа:

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

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

При оценке фоновых засветок, согласно работе [2], освещенность поверхности в дневное время задавалось величиной $E = 0.5\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\text{нм}^{-1}$. Для альбедо вводились значения 0.1, 0.5 и 0.9, а также 0.001 и 0.01, имитирующие измерения в ночное время. При расчете темновой компоненты шума скорость поступления темновых фотоимпульсов задавалось величиной $f_T = 50\text{имп} \cdot \text{с}^{-1}$

Результаты расчета погрешностей измерений плотности атмосферы

Точностные характеристики измерений плотности атмосферы космическим лидаром приведены на рис. 1. Верхние две панели для приемного зеркала с радиусом 0.3 м, нижние две – для зеркала с радиусом 0.5 м. Для наихудшего варианта (левый верхний график) – светофильтр с шириной 10 нм и поле зрения 1 мрад измерения с уровнем погрешности менее 10% реализуются на высотах от 33 км и ниже в дневное время и к ночному времени диапазон высот возрастает до 50 км. С уменьшением ширины светофильтра до 0.5 нм потолок уровня 10%-ой погрешности измерений возрастает днем до 40 км, ночью до 60 км. Качество измерений значительно улучшается, если использовать более узкое поле зрения приемного телескопа 0.1 мрад (вторая панель рис.1). При уменьшении ширины светофильтра до 0.5 нм измерения с точностью 10% и выше возможны с высот 53-75 км (при переходе от дневных условий к ночным) до верхней тропосферы с возрастающей точностью до менее 0.1%.

Использование приемного зеркала большего радиуса 0.5 м (см. две нижние панели рис.1.) для обеих полей зрения 1 и 0.1 мрад дает некоторое увеличение уровня высоты 10% погрешности: при ширине светофильтра 10 нм – на 3-4 км, 1 нм – на 2-3 км и 0.5 нм – в среднем на 3 км. Видно, что это небольшое расширение интервала высот в сторону верхней границы зондирования. Поэтому применение более крупногабаритной приемной оптики, установка которой на борт космического аппарата представляет определенные трудности, не является результативной.

Зондирование на длине волны 266 нм

Исходные данные были аналогичны лидару с лазером на 353 нм. Исключение составляла энергия импульса излучения, которая задавалась величиной $E_0 = 0.2\text{Дж}$

Преимуществом зондирования на длине волны 266 нм, как отмечалось ранее, является более интенсивное взаимодействие излучения с молекулярной атмосферой как рассеивающей средой. Оно в 16 раз больше по сравнению с длиной волны 532 нм, и дает пропорциональное увеличение лидарных сигналов. Кроме того, что является не менее важным, этот диапазон спектра является “солнечно-слепым”, т.е. отсутствуют фоновые засветки и исчезают проблемы с использованием узкого поля зрения. Но есть и существенный недостаток при работе с этим излучением. Длина волны 266 нм попадает почти в центр сильной полосы поглощения озона Хартли. Поэтому при зондировании средней стратосферы, где находится озоновый слой, следует ожидать сильного ослабления лидарных сигналов за счет поглощения озоном.

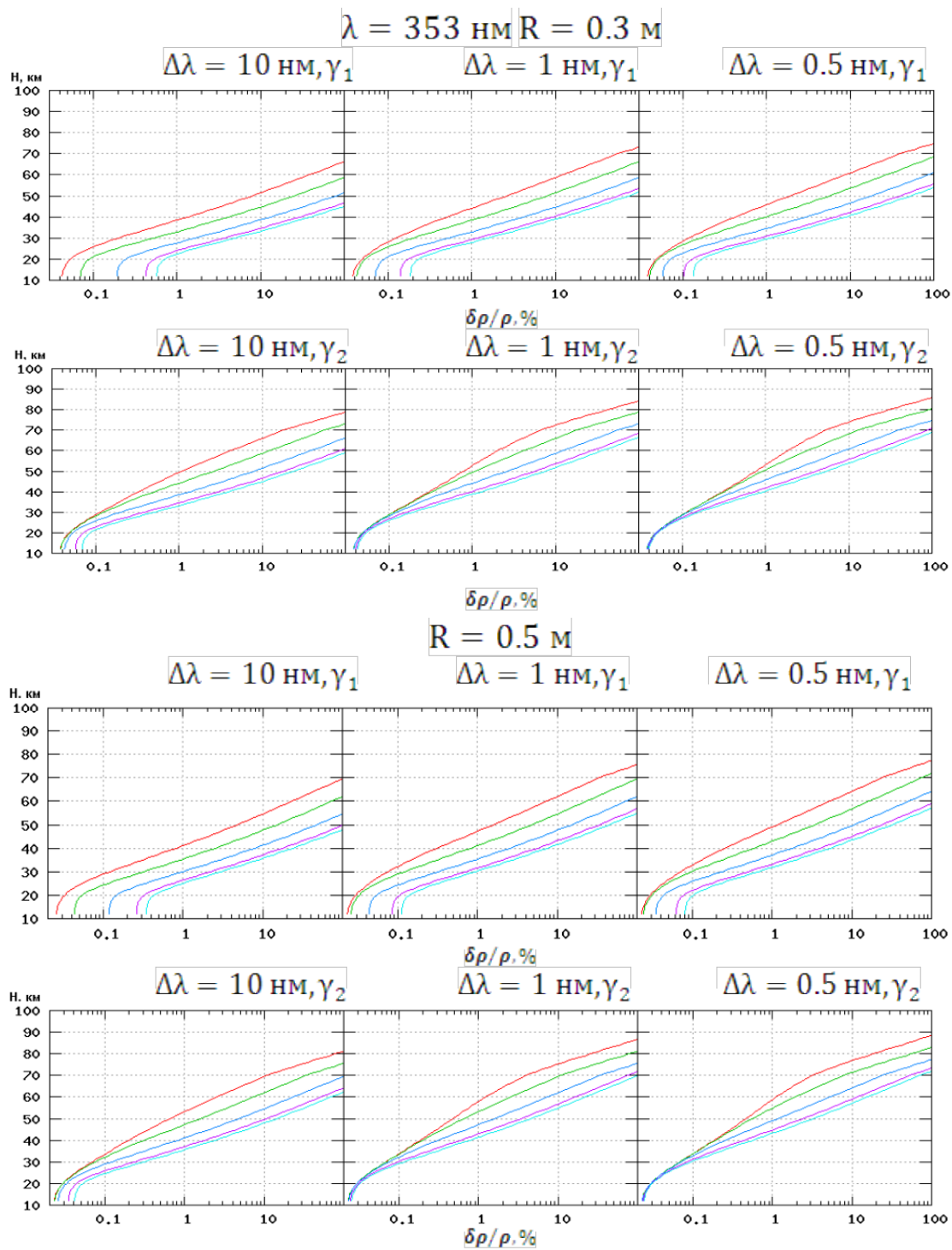


Рис. 1. Стандартное отклонение лидарных измерений плотности атмосферы на длине волны 353 нм

Результаты расчета погрешностей измерений плотности атмосферы

Расчеты профилей стандартного отклонения лидарных измерений плотности приведены на рис.2. Если, как и ранее, задаться 10% уровнем погрешности, то наблюдения возможны с высоты 83км лидаром с зеркалом 0.3 м и с высоты 88 км лидаром с зеркалом 0.5 м. По мере проникновения в глубь атмосферы точность измерений увеличивается и достигает максимума на высоте около 48 км менее 1%. На более низких высотах начинает сказываться поглощение озоном, которое ограничивает лидарные измерения плотности атмосферы высотой около 38 км.

Таким образом, использование более короткого УФ-излучения с длиной волны 266 нм позволяет продвинуться в более высокие слои атмосферы, вплоть до границы верхней мезосферы. При этом, в отличие от излучения 353 нм, приведенный на рис.2. высотный диапазон измерений реализуем независимо от времени суток.

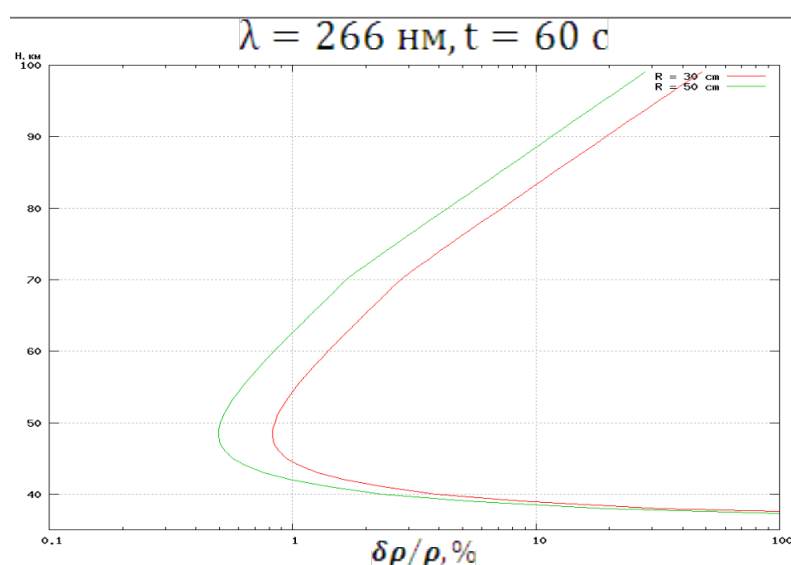


Рис. 2. Стандартное отклонение лидарных измерений плотности атмосферы на длине волны 266 нм

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН №106, РФФИ (проект 13-05-01036а) и Минобрнауки РФ (ГК №14.518.11.7053, соглашение № 14.В37.21.0612).

Литература

1. Маричев В.Н, Бочковский Д.А. Лидарные измерения плотности воздуха в средней атмосфере в видимом диапазоне. Расчет потенциальных возможностей. // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. -2013. -М.:РАН
2. Djeff Dozier A Clear-Sky Spectral Solar Radiation Model for Snow-Covered Mountainous Terrain. // Water recourses research. -1980. -V.16. -NO.4. -P.709-718.

Lidar measurements of air density in the middle atmosphere. Modeling of potential capabilities in spectrum UV region

Marichev V.N., Bochkovsky D.A.

Errors in lidar measurements of the air density in the middle atmosphere are analyzed. A lidar was placed on board the ISS. A solid-state Nd: YAG laser operating at the 3rd and 4th harmonics with wavelengths of 353 and 266 nm was used as a lidar transmitter. Calculations were performed for the lidar with reasonable parameters: pulse energy 0.4 (353 nm) and 0.2 J (266 nm), pulse repetition frequency 20 Hz, accumulation time 60 s, radius of the receiving mirrors 0.3 and 0.5 m, field of view of the receiving telescope 1 and 0.1 mrad, filter bandwidth 0.5, 1, and 10 nm, and spatial resolution 1 km. The results showed, that radiation at the wavelength of 353 nm can cover the altitude range, on average, from 75 km at night and from 55 km in the daytime to 10 km depending on the parameters of a lidar with 10% measurement errors (calculations were not carried out below 10 km). When operating with the radiation at 266 nm for 10% measurement error, the sensing range can be expanded to the upper mesosphere at 90 km and penetrate deeper into the atmosphere down to 38 km. Thus, the use of two harmonics allows the altitude range of air density measurements from the ISS to be expanded from 90 km down to the troposphere.