

УДК 551.501.42

## Лидарные измерения плотности воздуха в средней атмосфере. Часть 2. Моделирование потенциальных возможностей зондирования в УФ-области спектра

В.Н. Маричев<sup>1,2</sup>, Д.А. Бочковский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 29.03.2013 г.

Выполнен анализ оценки погрешностей лидарных измерений плотности средней атмосферы. Рассматривался установленный на МКС лидар. В качестве передатчика лидара был взят твердотельный Nd:YAG-лазер с излучением на 3-й и 4-й гармониках с длинами волн 355 и 266 нм. Расчеты проведены для лидара с умеренными параметрами: энергия импульса 0,4 Дж (355 нм) и 0,2 Дж (266 нм), частота посылок 20 Гц, время накопления 60 с, радиус приемных зеркал 0,3 и 0,5 м, поле зрения приемного телескопа 1 и 0,1 мрад, полоса пропускания светофильтров 0,5, 1 и 10 нм, пространственное разрешение 1 км. Результаты анализа показали, что излучением на длине волны 355 нм в зависимости от параметров лидара на уровне 10%-й погрешности измерений можно охватить диапазон высот в среднем от 75 км в ночное время и от 55 в дневное до 10 км (ниже расчеты не проводились). При работе с излучением на 266 нм на уровне 10%-й погрешности удается продвигаться до границы верхней мезосферы 90 км и проникнуть в глубь атмосферы до высоты 38 км. Таким образом, использование двух гармоник позволит освоить диапазон высот измерений плотности воздуха с борта МКС с 90 км до тропосферы.

Ключевые слова: плотность воздуха, средняя атмосфера, лидар; air density, middle atmosphere, lidar.

### Введение

В 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 532 нм. Преимущество зондирования атмосферы в видимом спектральном диапазоне состоит в более высокой энергии излучения на 2-й гармонике по сравнению с гармониками более высокого порядка и более простой и доступной юстировке приемопередающего тракта лидара. Рассматривались варианты зондирования с поверхности земли, с самолета и из космоса. Расчеты проведены при следующих исходных данных: передатчик с энергией импульса 0,8 Дж и частотой посылок 20 Гц. Приемная система: главное зеркало радиусом 0,3 и 0,5 м, поле зрения приемного телескопа  $\gamma_1 = 1$  мрад и  $\gamma_2 = 0,1$  мрад, спектральная ширина светофильтра  $\Delta\lambda - 0,5, 1$  и 10 нм. Время накопления сигнала — 10 мин при пространственном разрешении 1 км.

Было показано, что на уровне стандартного отклонения 10% для наилучшего варианта — самолетного — достижимы следующие 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 — днем, 45–67 — ночью. 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 видимой и ультрафиолетовой длин волн. Для выбранных длин волн — это третья и четвертая гармоники Nd:YAG-лазера с длинами волн 355 и 266 нм, усиление взаимодействия, в данном случае рассеяния, будет в 5,04 и 16 раз больше по сравнению с длиной волны 532 нм. Следовательно, во столько же раз будут больше лидарные сигналы (сигналы обратнорассеянного света). Но вместе с тем нужно учитывать, что и молекулярное ослабление лидарных

\* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru);  
Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru).

сигналов в УФ-диапазоне за счет молекулярного рассеяния будет больше, а для излучения на длине волны 266 нм 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, приведенным в [1].

## 1. Зондирование на длине волны 355 нм

### 1.1. Исходные данные

Расчеты лидарных сигналов проводились для двух апертур радиусами 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 355 нм  $h\nu = 5,63 \cdot 10^{-19}$  Дж, пропускание приемопередающего тракта  $T_{\text{пт}} = 0,2$ , пространственное разрешение  $\Delta H = 1$  км, частота посылки импульсов  $f = 20$  Гц, время накопления сигнала  $\Delta t = 60$  с. При накоплении 60 с горизонтальное разрешение составит 500 км. Измерения при накоплении 10 мин бессмысленны – разрешение 5 тыс. км. Лидар установлен на борту Международной космической станции (МКС), высота орбиты вращения 414 км.

Значения фонового сигнала рассчитывались при пропускании приемной системы  $T_{\text{пс}} = 0,3$ , трех значениях спектральных ширин интерференционных фильтров и двух полей зрения приемного телескопа:  $\Delta\lambda_1 = 0,5$ ,  $\Delta\lambda_2 = 1$ ,  $\Delta\lambda_3 = 10$  нм;  $\gamma_1 = 1$ ,  $\gamma_2 = 0,1$  мрад.

При оценке фоновых засветок, согласно работе [2], освещенность поверхности в дневное время задавалась величиной  $E = 0,5$  Вт  $\cdot$  м $^{-2}$   $\cdot$  нм $^{-1}$ . Для альбедо вводились значения 0,1; 0,5 и 0,9 для сумеречных и дневных условий, а также значения 0,001 и 0,01, взятые для измерений в ночное время. При расчете темновой компоненты шума скорость поступления темновых фотоимпульсов задавалось величиной  $f_T = 50$  имп/с.

### 1.2. Результаты расчета погрешностей измерений плотности атмосферы

Точностные характеристики измерений плотности атмосферы космическим лидаром приведены на рис. 1.

Два верхних ряда для приемного зеркала радиусом 0,3 м, два нижних – для зеркала 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%-й погрешности измерений воз-

растает днем до 40, 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. два нижних ряда рис. 1) для обоих 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.

## 2. Зондирование на длине волны 266 нм

### 2.1. Исходные данные

Основные параметры лидара с лазером на длине волны 266 нм были аналогичны параметрам лидара с лазером на 355 нм. Исключение составляла энергия импульса излучения, которая задавалась величиной  $E_0 = 0,2$  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.

### 2.2. Результаты расчета погрешностей измерений плотности атмосферы

Расчеты профилей стандартного отклонения лидарных измерений плотности атмосферы приведены на рис. 2.

Если, как и ранее, задаться 10%-м уровнем погрешности, то наблюдения возможны с высоты 83 км лидаром с зеркалом 0,3 м и с высоты 88 км лидаром с зеркалом 0,5 м. По мере проникновения в глубину атмосферы точность измерений увеличивается и достигает максимума на высоте около 48 км (менее 1%).

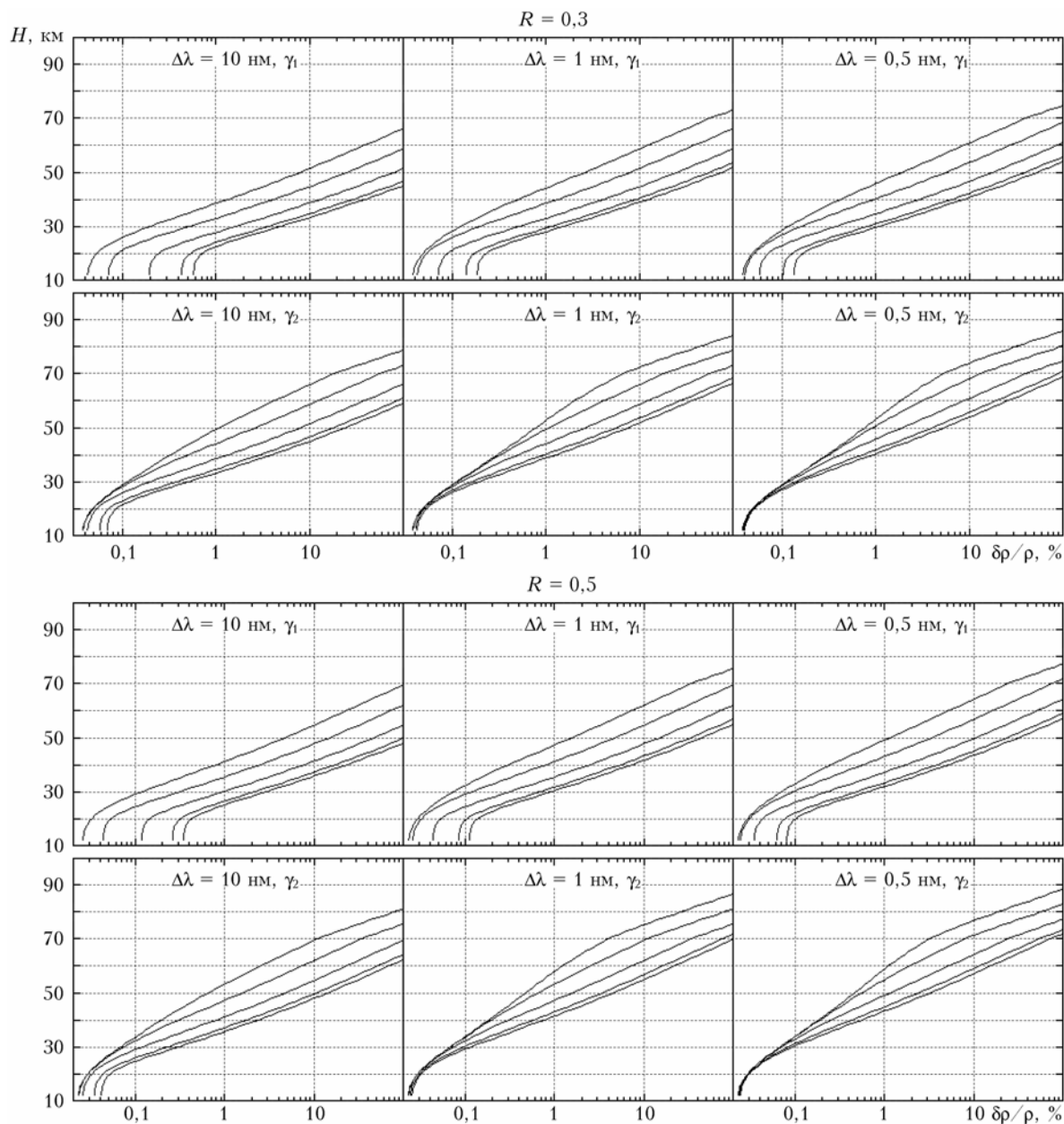


Рис. 1. Стандартное отклонение лидарных измерений плотности атмосферы  $\rho$  на длине волны 355 нм. Обозначения кривых снизу вверх для значений альbedo 0,9; 0,5; 0,1; для альbedo дневных и сумеречных условий и альbedo 0,01 и 0,001 ночных условий

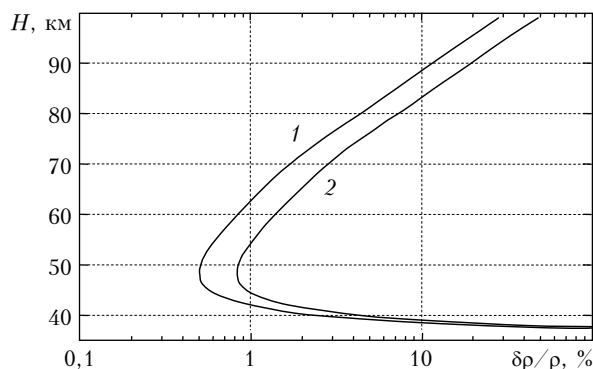


Рис. 2. Стандартное отклонение лидарных измерений плотности атмосферы на длине волны 266 нм,  $\Delta t = 60$  с. Зеркало радиусом 0,5 (1), 0,3 м (2)

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 на длине волны 355 нм, приведенный на рис. 2 высотный диапазон измерений реализуем независимо от времени суток.

### Заключение

Измерение плотности атмосферы в УФ-диапазоне спектра из космоса оказалось значительно эффективнее по сравнению с измерениями в видимом

диапазоне. Так, проведенные оценки потенциальных возможностей зондирования средней атмосферы с борта МКС для рассмотренных выше лидаров показали следующее:

1. Использование длины волны 266 нм позволяет продвинуться вверх вплоть до границы верхней мезосферы с уровнем погрешности 10%.

2. Использование длины волны 355 нм дает возможность измерений с погрешностью 10% с высот 40 км, которая будет уменьшаться с высотой до 1% и менее в нижней стратосфере.

Применение лидара с передатчиками, работающими одновременно на длинах волн 266 и 355 нм, и с одним приемным телескопом решает проблему измерений плотности средней атмосферы в диапазоне высот от верхней мезосферы до 10–20 км (ограничения на нижние высоты будут зависеть от присутствия аэрозоля) с уменьшающейся по высоте по-

грешностью. При этом приведенные возможности сохраняются в дневное время суток.

Авторы выражают благодарность Г.Г. Матвиенко за поставленную задачу.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 106, РФФИ (проект № 13-05-01036а) и Минобрнауки РФ (ГК № 14.518.11.7053, соглашения № 14.В37.21.0612, 8510).

1. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Лидарные измерения плотности воздуха в средней атмосфере. Часть 1. Моделирование потенциальных возможностей при зондировании в видимой области спектра // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 553–563.
2. *Jeff Dozier.* A Clear-Sky Spectral Solar Radiation Model for Snow-Covered Mountainous Terrain // Water Resources Res. 1980. V. 16, N 4. P. 709–718.

*V.N. Marichev, D.A. Bochkovsky. Lidar measurements of air density in the middle atmosphere. Part 2. Modeling of the potential sounding capabilities in the UV spectrum.*

Errors in lidar measurements of the air density in the middle atmosphere are analyzed. A lidar was placed onboard the ISS. A solid-state Nd:YAG-laser, operating at the 3rd and 4th harmonics with wavelengths of 355 and 266 nm, was used as a lidar transmitter. Calculations were performed for the lidar with reasonable parameters: pulse energy of 0.4 (355 nm) and 0.2 J (266 nm), pulse repetition frequency of 20 Hz, accumulation time of 60 s, radius of the receiving mirrors of 0.3 and 0.5 m, field of view of the receiving telescope of 1 and 0.1 mrad, filter bandwidth of 0.5, 1, and 10 nm, and spatial resolution of 1 km. The results showed that radiation at a wavelength of 355 nm can cover altitude range, on average, from 75 km at night and from 55 km in the daytime to 10 km depending on the parameters of the lidar with 10% measurement errors (calculations were not carried out below 10 km). When operating with 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 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.