

Моделирование потенциальных возможностей измерений температуры в средней атмосфере лидаром из космоса

МАРИЧЕВ В. Н., БОЧКОВСКИЙ Д. А.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
email: marichev@iao.ru moto@iao.ru

Ранее нами в работах [1,2] при моделировании лидарных измерений плотности атмосферы из космоса было показано, что использование в лидарах лазеров ультрафиолетового диапазона длин волн более эффективно по сравнению с лазерами видимого диапазона. УФ-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 355 и 266нм усиление взаимодействия, в данном случае рассеяния, будет в 5.04 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.

Процедура оценки точности измерений

Процедура оценки погрешности измерения температурных профилей проводилась следующим образом. Вначале рассчитывался профиль температуры по модельному лидарному сигналу при нулевых значениях шумовых компонент. Данный профиль принимался как контрольный (реперный). Затем к лидарному сигналу добавлялись его собственный шум $N^{1/2}$, темновой шум и шум от фона со знаками плюс-минус как $\pm (N^{1/2} + N_{\Phi} + N_T)$ и рассчитывались профили температуры с отклонением от реперного в положительную и отрицательную стороны. Формулы, по которым производился расчет, приведены в [1]. Все полученные кривые в виде графиков наносились на один рисунок, по которому можно было проследить величину отклонения профилей, вызванных шумами, от контрольного.

Относительно шумовых компонент следует отметить, что собственный дробовой шум сигнала изменяется по трассе зондирования (высоте), темновой остается постоянным, а фоновый, оставаясь также постоянным по высоте, значительно изменяется в зависимости от освещенности земной поверхности (день, ночь) и является доминирующим в ограничении точностных характеристик измерений.

Зондирование на длине волны 355нм

Расчеты лидарных сигналов проводились для двух апертур с диаметрами 0.4 и 1м в интервале высот 10 - 100км при следующих входных параметрах для длины волны 355нм: квантовая эффективность фотоприемника $\eta=0.2$, энергия лазерного импульса $E_0=0.4$ Дж, энергия фотона на длине волны 353нм $h\nu=5.636 \times 10^{-19}$ Дж, пропускание приемопередающего тракта 0.2, пространственное разрешение $\Delta H=1$ км, частота посылки импульсов $f=20$ Гц, время накопления сигнала $\Delta t_1=12$ с и $\Delta t_2=60$ с. Лидар установлен на борту КА с радиусом высоты орбиты вращения 414км. Расчет лидарных сигналов (рассеяние, ослабление) проводился по модели атмосферы [3].

Значение фонового сигнала рассчитывалось для пропускания приемной системой $T_{апш,пр}=0.3$ при двух значениях ширин интерференционных фильтров и двух полей зрения приемного телескопа:

$$\Delta\lambda_1 = 1\text{нм}, \gamma_1 = 1\text{мрад};$$
$$\Delta\lambda_2 = 0.05\text{нм}, \gamma_2 = 0.5\text{мрад}.$$

При оценке фоновых засветок, согласно работе [4], освещенность поверхности в дневное время задавалась величиной $E=0.5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}$. Для альbedo вводились значения 0.9, 0.5, 0.1, 0.01 и 0.001, имитирующие измерения в дневное, сумеречное и вечернее время суток. Для ночных условий (при луне), согласно работе [5], лунная освещенность определялась значением 0,0002—0,0003% от солнечной (соответствующие имитирующие значения альbedo 3×10^{-6} , 1.5×10^{-6} , 1×10^{-6}). При расчете темновой компоненты шума скорость поступления темновых фотоимпульсов выбиралась как типичное для фотоприемников с $f_T = 50 \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1}$.

Точностные характеристики измерений температуры космическим лидаром с диаметром приемного зеркала 0.4м и 1м для поля зрения 1мрад, разных ширин световых фильтров и времени накопления 12с приведены на рис. 1. На всех графиках центральная кривая (красная линия) представляет профиль температуры, рассчитанный по лидарному сигналу в отсутствии шумов, 10% интервал отклонений (зеленая линия), остальные кривые – среднее квадратичное отклонение при расчете температуры из лидарных сигналов с учетом влияния фоновых засветок от максимальных значений до минимальных (дневные, сумеречные, вечерние и ночные условия). Все графики рассчитаны для высоты калибровки $H_m = 60 \text{ км}$.

Предельная высота измерений температуры из космоса, в км, при поле зрения 1мрад и времени накопления 12с представлен в таблице 1. Из таблицы видно, что для зеркала диаметром 0.4 м, измерения возможны только в ночное время суток и только до 40 км. Измерения температуры для лидара с диаметром зеркала 1 м, с уровнем погрешности 10%, выполнимы во всем диапазоне высот 10-60 км в вечернее и ночное время суток.

Аналогичные результаты расчетов для поля зрения приемного телескопа 0.5 мрад и времени накопления 60с показаны на рис.2. Здесь ситуация выглядит значительно лучше. Так, для лидара с диаметром апертуры 0.4м, при ширине полосы светофильтра 1нм, измерения с уровнем погрешности 10% реализуемы в интервале высот 20-60км в вечернее и ночное время, а при ширине интерференционного фильтра 0.05нм, измерения возможны в сумеречное время суток. Для лидара с диаметром зеркала 1м, при ширине полосы светофильтра 0.05нм измерения с уровнем погрешности 10% реализуемы во всем интервале высот 20-60км днем и при ширине полосы 1нм в вечернее время. В таблице 2 представлена предельная высота измерений температуры из космоса, в км, при поле зрения 0.5мрад и времени накопления 60с.

Таблица 1. Предельная высота измерений температуры из космоса (от поверхности Земли, в км), с уровнем погрешности 10% при поле зрения 1мрад и времени накопления 12с, двух значениях ширин интерференционных фильтров и разных значений альbedo. Значения альbedo: 1 – 0,9; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – 0,01; 5 – 0,001; 6 – $3 \cdot 10^{-6}$, $1,5 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-6}$ (ночные измерения);

R \ Az	$\Delta\lambda_1=1\text{нм}$						$\Delta\lambda_2=0.05\text{нм}$					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.2 м	12	14	20	29	37	40	23	25	32	38	40	
0.5 м	19	21	27	39	60		31	34	44	60		

Зондирование на длине волны 266нм

При зондировании на длине волны 266нм. исходные данные были аналогичны лидару с лазером, работающим на длине волны 355нм. Исключение составляли энергия импульса излучения и энергия кванта, которые задавались величинами $E_0 = 0.2 \text{ Дж}$ и $7.4 \times 10^{-19} \text{ Дж}$, и нулевая освещенность. Преимуществом зондирования на длине волны 266нм, как

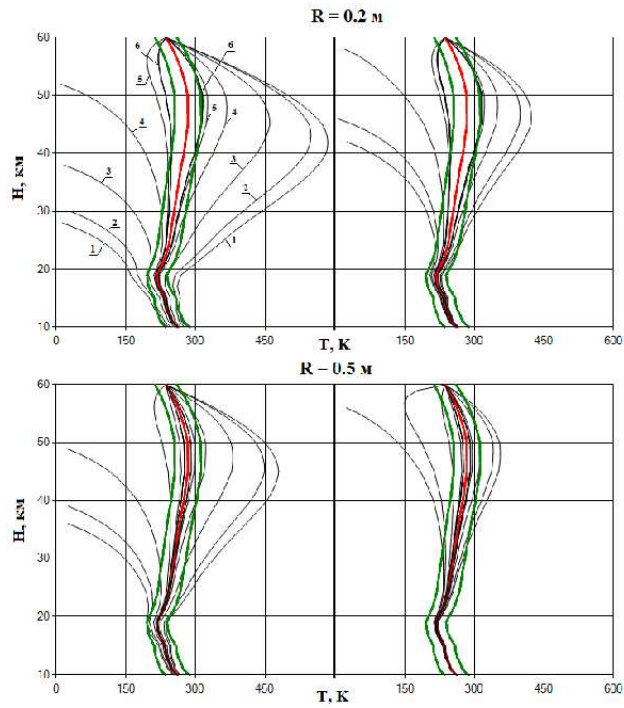


Рис. 1. Отклонения рассчитанных по лидарным сигналам профилей температуры от контрольного, возникающие за счет фоновых шумов. Параметры расчета: $R_1 = 0.2$ м, $R_2 = 0.5$ м; $H_m = 60$ км; γ

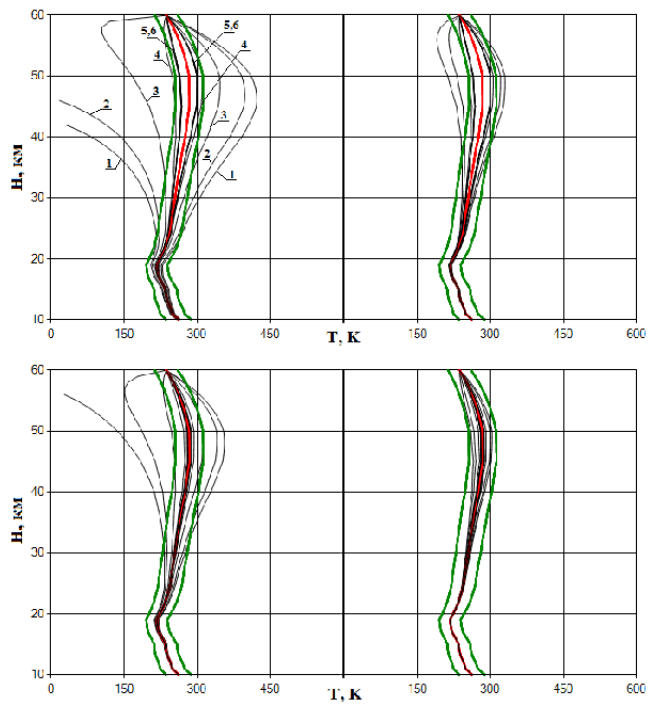


Рис. 2. Аналогично рис. 1, для поля зрения 0.5 мрад и времени накопления 60 с.

Таблица 2. Аналогично таблице 1, для поля зрения 0.5 мрад и времени накопления 60с.

	$\Delta\lambda_1=1\text{нм}$						$\Delta\lambda_2=0.05\text{нм}$					
R/Аз	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.2 м	23	26	33	45	60		37	40	60			
0.5 м	31	34	44	60			60					

отмечалось ранее, является более интенсивное взаимодействие излучения с молекулярной атмосферой как рассеивающей средой. Оно в 16 раз больше по сравнению с длиной волны 532нм, и дает пропорциональное увеличение лидарных сигналов. Кроме того, что является не менее важным, за счет поглощения стратосферным озоном излучение в данном спектральном диапазоне не достигает поверхности Земли, и, следовательно, отсутствуют фоновые засветки отраженной солнечной радиации от земной поверхности. Но есть и существенный недостаток при работе с этим излучением. Длина волны 266нм 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. Расчеты лидарных сигналов проводились по атмосферной модели [3]. Для учета поглощения лазерного излучения озоном использовались данные по высотному распределению его концентрации, заимствованные из [6]. Сечение поглощения озона на длине волны 266нм была взята равной $947 \cdot 10^{-20} \text{см}^2 \text{мол}^{-1}$ из [7].

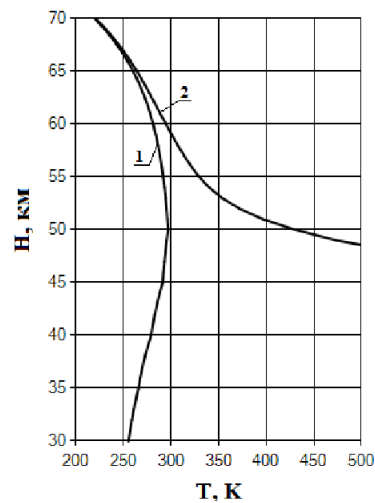


Рис. 3. Профили температуры, рассчитанные по лидарным сигналам на длине волны 266 нм, без учета (кривая 1) и с учетом (кривая 2) поглощения озоном.

Результаты оценки точности восстановления температуры из лидарных сигналов для двух приемных зеркал демонстрируются на рис.3. Здесь отсутствуют такие параметры, как величина полосы пропускания фильтра и поле зрения приемной антенны, т.к. они практически не влияют на ошибку измерений. На рисунке приведены профили температуры, рассчитанные для лидарных сигналов при нулевых шумах без учета поглощения озоном (кривая 1) и с его учетом (кривая 2). В данном случае из-за малой среднеквадратичной ошибки, вызванной собственными и темновыми шумами, кривые 1 и 2 для зеркал с диаметром 0.4 и 1.0м сливаются.

Из рис.3 видно, что при высоте калибровки 70км кривые 1 и 2 начинают резко расходиться уже с высоты 65км.. Это означает, систематическая ошибка, возникающая из-за по-

глощения излучения озоном, в принципе не позволяет использовать казалось бы перспективный УФ-диапазон в области 266нм для измерения температуры. Хотя при отсутствии озона достигалась бы очень хорошая точность измерений, не превышающую погрешность нескольких К во всем диапазоне высот 20-60км.

Заключение

Из сравнения расчетных результатов моделирования лидарных измерений температуры из космоса выпускаемыми лазерными источниками УФ-диапазона 355нм и 266нм к применению подходит только лазер, работающий на длине волны 355нм. Использование в лидаре лазера с длиной волны 266нмв измерениях ниже высот 65км невозможно из-за влияния поглощения излучения озоном. Учесть его нельзя, поскольку озон – это газовая компонента с реальной пространственно-временной изменчивостью. Последняя при расчете температуры по лидарным сигналам приводит к ее ложным отклонениям от реальных значений.

Космический лидар с использованием передатчика на длине волны 355нм с достаточно его умеренными параметрами (см.выше) позволяет:

- проводить надежные измерения температуры в интервале высот 10-60к над затемненной поверхностью земного шара.

- при уменьшении поля зрения приемной системы до 0.5мрад и достаточно узких полос пропускания светофильтров порядка 0.05нм реализовывать измерения в дневное время суток.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ4714.2014.5, гранта РФФИ №14-27-00022 и гранта РФФИ № 16-05-00901

Литература

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 атмосферы и океана. 2013. Т26. №7. С.553-563.
2. Маричев В.Н., Бочковский Д.А Лидарные измерения плотности воздуха в средней атмосфере. Часть 2: моделирование потенциальных возможностей при зондировании в УФ-области спектра. //Оптика атмосферы и океана. 2013. Т26. №8. В печати.
3. З.Ипполитов И.И., Комаров В.С., МицельА.А. Оптикометеорологическая модель атмосферы для моделирования лидарных измерений и расчета распространения радиации.//Сборник “Спектрометрические методы зондирования атмосферы”. Н-ск. Из-во “Наука”. 1985. С.4-44.
4. Jeff Dozier. A Clear-Sky Spectral Solar Radiation Model for Snow-Covered Mountainous Terrain. // Water resources research. 1980. V.16. NO.4. P.709-718.
5. <http://about-space.ru/rasseyanscet?start=41>
6. Зуев В.Е., Комаров В.С.Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы.// Ленинград. Гидрометеоиздат.1986. 264С.
7. Molina L.T., Molina M. J. Absolute absorption cross sections of ozone in the 185–150 nm wavelength range. //J. Geoph. Res. 1986. V.91, NO. 13. P.14501.