

УДК 551.510.532:551.501.816

## Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеопараметров с помощью обертонового СО-лазера

Г.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, О.А. Романовский<sup>1,2</sup>, О.В. Харченко<sup>1</sup>, С.В. Яковлев<sup>1,2\*</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 18.11.2013 г.

Исследованы возможности применения обертонового СО-лазера для лидарных измерений профилей температуры и влажности атмосферы методом дифференциального поглощения в средней ИК-области спектра. Определены длины волн, перспективные для лидарных измерений метеопараметров. Проведен расчет пространственно- и спектрально-разрешенных лидарных сигналов и случайных ошибок восстановления профилей с помощью предложенных длин волн.

*Ключевые слова:* лидар, метеорологические параметры, атмосфера, СО-лазер; lidar, meteorological parameters, atmosphere, CO laser.

### Введение

Спектральный диапазон длин волн 2,5–4,2 мкм, в котором расположены линии генерации обертонового СО-лазера, является наиболее информативным с точки зрения лидарных измерений профилей как основных газовых компонентов, так и метеорологических параметров атмосферы [1, 2]. Находящиеся в этой области спектра полосы и линии поглощения водяного пара различной интенсивности дают возможность практической реализации трехчастотного метода дифференциального поглощения [3] для зондирования температуры и влажности. Для этих целей можно было бы использовать химические HF- или DF-лазеры, спектры генерации которых находятся в интервале 2,7–4,5 мкм, однако сами HF- или DF-лазеры работают на достаточно токсичных активных средах [4]. К тому же количество линий генерации СО-лазера (~1000 линий суммарно на основных и обертоновых переходах [5]) во много раз превосходит число линий генерации HF- и DF-лазеров вместе взятых (несколько десятков линий), что обеспечивает гораздо больше совпадений длин волн лазерной генерации и линий поглощения зондируемых газов. Таким образом, обертоновый СО-лазер является перспективным устройством для дистанционного лазерного зондирования профилей метеорологических параметров атмосферы.

В настоящей статье представлены результаты исследования возможностей применения обертонового СО-лазера для лидарных измерений профилей температуры и влажности атмосферы методом дифференциального поглощения в средней ИК-области спектра.

### Результаты поиска информативных длин зондирования

Для поиска длин волн, информативных для лидарных измерений профилей температуры и влажности методом дифференциального поглощения, была применена методика [6].

Результаты выбора линий поглощения водяного пара, пригодных для лидарных измерений профилей влажности и температуры в нижней тропосфере, приведены в табл. 1, где указаны параметры выбранных линий поглощения  $\nu_{\text{полг}}$  и способы организации линий излучения  $\nu_{\text{изл}}$  обертонового СО-лазера.

Для зондирования профилей влажности может быть использована линия  $P(6)$  с энергией нижнего состояния около  $210 \text{ см}^{-1}$ , которая позволяет минимизировать влияние вариаций температуры на ошибки расчета коэффициента поглощения  $K(\nu, z)$ . В качестве референтной частоты *off line* может быть использована линия излучения обертонового СО-лазера  $P(10)$  с центром  $2999,78241 \text{ см}^{-1}$ .

Для реализации трехчастотной методики зондирования профилей температуры перспективным, с нашей точки зрения, является использование пары линий поглощения 1 и 2 и 2 и 3 с большой разностью энергий нижнего состояния  $\Delta E$ .

\* Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Олег Анатольевич Романовский (goa@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Семен Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

Таблица 1

Спектральные параметры линий поглощения водяного пара (интенсивность  $S_0$ , полуширина  $\gamma$ , энергия нижнего уровня  $E''$ ) и способ организации линии излучения обертонового СО-лазера для зондирования профилей метеорологических параметров атмосферы

№ линии	$\nu_{\text{погл}}, \text{см}^{-1}$ (вакуум)	$\nu_{\text{изл}}, \text{см}^{-1}$ (вакуум)	Лазерная линия	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	$S_0, \text{см}^2/\text{молек.}$	$\gamma, \text{см}^{-1}$	$E'', \text{см}^{-1}$
1	3017,10530	3017,1651	$P(5)$	0,060	$2,016e^{-25}$	0,0799	2392,592
2	3013,91523	3013,89052	$P(6)$	0,024	$1,077e^{-24}$	0,0971	210,799
3	3006,97480	3006,91035	$P(8)$	0,064	$2,731e^{-25}$	0,0933	1813,788
4	—	2999,78241	$P(10)$	—	—	—	—

На рис. 1 представлены спектры поглощения атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации обертонового СО-лазера. Из табл. 1 и рис. 1 видно, что выбранные линии поглощения водяного пара с хорошей точностью ( $\Delta\nu \leq 0,1 \text{ см}^{-1}$ ) совпадают с дискретными линиями генерации лазера на окиси углерода.

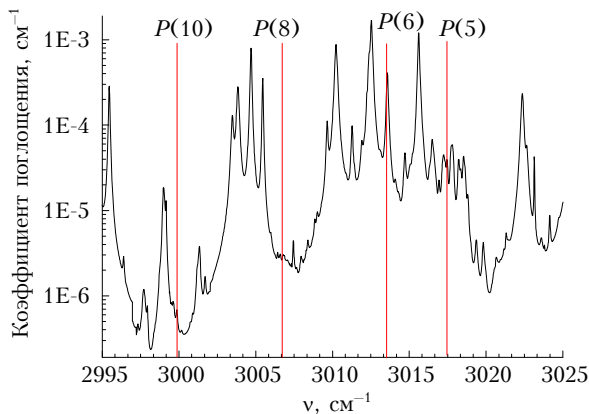


Рис. 1. Спектры поглощения атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации обертонового СО-лазера

Таким образом, в результате поиска с помощью методики [6] определены информативные длины волн для лидарных измерений метеорологических параметров атмосферы в диапазоне генерации обертонового СО-лазера (средняя ИК-область спектра).

## Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеопараметров

Для оценки возможностей лидарного зондирования метеопараметров атмосферы с помощью обертонового СО-лазера проведен расчет лидарных сигналов и случайных ошибок восстановления профилей температуры и влажности с использованием выбранных информативных волн зондирования.

Расчеты проводились для условий ночной атмосферы и чистого неба. Пространственное разрешение бралось равным 0,5 км. Профили коэффициентов поглощения рассчитывались для фойгтовского контура с учетом поглощения крыльями соседних линий для атмосферных моделей «лето и зима средних широт» [7]. Коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния и аэрозольного поглощения взяты из модели [8].

Входные данные для проведения численного моделирования лидарного зондирования метеопараметров атмосферы с помощью обертонового СО-лазера представлены ниже.

Параметр лидарной системы

Площадь приемника $A_{\text{пр}} (D = 0,3 \text{ м})$	Значение параметра
Ширина аппаратной функции	$700 \text{ см}^2 = 7 \cdot 10^{-8} \text{ км}^2$
Эффективность приемной системы	0,01 $\text{см}^{-1}$
Пространственное разрешение $\Delta R$	0,3
Пиковая мощность лазера	0,5 км
Диапазон перестройки лазера	$20 \cdot 10^3 \text{ Вт}$
Коэффициент обратного аэрозольного рассеяния $\beta_{\text{а}}$	2,5–4,2 мкм
NER фотодетектора	$2,3 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$
	$10^{-9} \text{ Вт}$

На рис. 2 представлены рассчитанные для вертикальных трасс летней и зимней атмосферных моделей пространственно- и спектрально-разрешенные лидарные эхосигналы в области выбранных длин волн зондирования метеорологических параметров атмосферы.

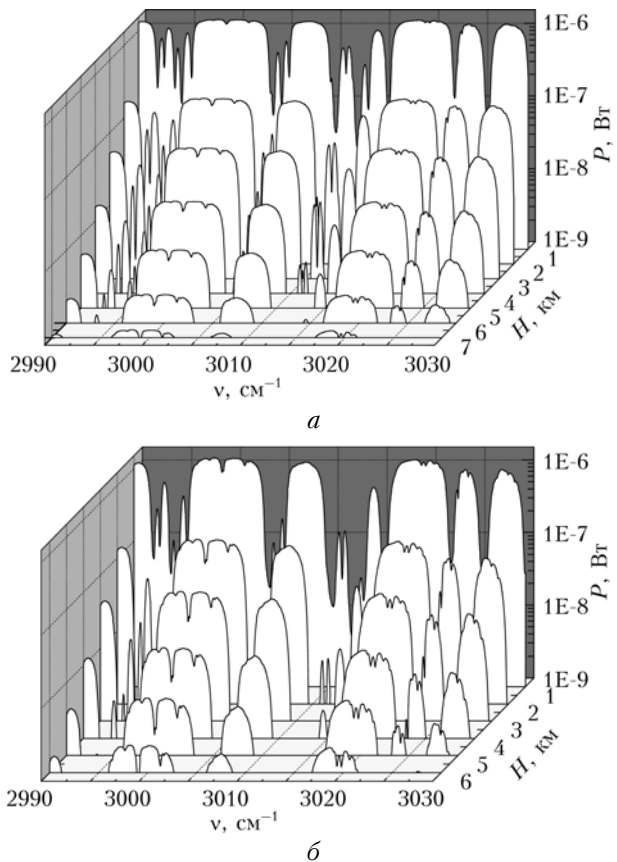


Рис. 2. Пространственно- и спектрально-разрешенные лидарные эхосигналы в области выбранных длин волн зондирования для летней (а) и зимней (б) моделей

Видно, что во всем рассматриваемом диапазоне высот 0–6 км уровень лидарных эхосигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника  $NEP = 10^{-9}$  Вт.

Результаты расчетов случайных ошибок восстановления профилей влажности и температуры приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Случайные ошибки восстановления профилей влажности и температуры

H, км	Ошибка восстановления			
	влажности $\Delta\rho/\rho$ , %		температуры $\Delta(T)$ , К	
	лето	зима	лето	зима
0,5	0,25	2,06	0,06	0,17
1	0,57	4	0,1	0,34
1,5	1,09	6,31	0,15	0,55
2	1,88	8,99	0,25	0,7
2,5	3,03	11,85	0,71	1,1
3	4,5	15,24	1,29	1,89
3,5	6,48	18,96	2	2,9
4	9	23,4	2,8	3,9
4,5	11,5	29	3,7	5
5	15,0	36	4,6	6,2
5,5	20	44	5,4	7,5
6	25	54	6,5	9

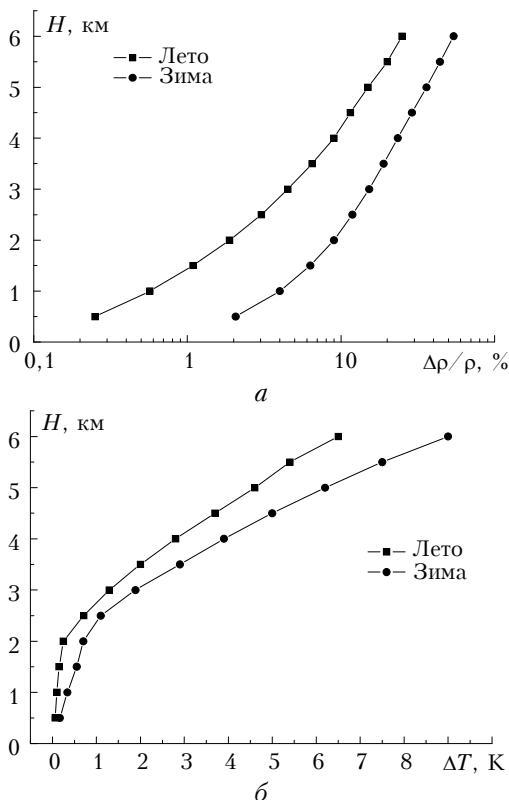


Рис. 3. Случайные ошибки восстановления профилей влажности (а) и температуры (б)

*G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii, O.V. Kharchenko, S.V. Yakovlev. Simulation of lidar measurements of profiles of atmospheric meteorological parameters using overtone CO laser.*

The possibility of the overtone CO laser for lidar measurements of atmospheric humidity and temperature profiles by differential absorption method in middle IR region is studied. Wavelengths for lidar measurements of meteorological parameters are found. The spatial and spectrally allowed lidar signals and random errors for reconstruction of profiles of atmospheric meteorological parameters using wavelength of overtone CO laser are calculated.

Проведенное численное моделирование показало, что лидар на основе обертонового СО-лазера с пиковой мощностью  $20 \cdot 10^3$  Вт обеспечивает дистанционное зондирование вертикальных профилей влажности атмосферы с пространственным разрешением 0,5 км при диаметре приемной оптики 0,3 м и эквивалентной мощности шума фотоприемника  $NEP = 10^{-9}$  Вт в диапазоне высот 0–5 км летом и 0–3 км зимой.

Случайная ошибка восстановления температуры составляет менее 1 К в диапазоне высот 0–2,5 км летом и 0–2 км зимой.

**Заключение**

Таким образом, проведенные расчеты подтверждают перспективность применения излучения обертонового СО-лазера для лидарных измерений профилей температуры и влажности атмосферы методом дифференциального поглощения в средней ИК-области спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-05-98074-р\_сибирь\_a.

1. *Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Романовский О.А., Селезнев Л.В., Синицын Д.В., Харченко О.В., Шелестович А.В., Яковлев С.В.* Широкодиапазонный СО-лазер в задачах лазерного зондирования малых газовых составляющих атмосферы // Изв. вузов. Физ. 2008. № 11. С. 85–92.
2. *Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В.* Возможности применения обертонового СО-лазера для дистанционного газоанализа атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 702–707.
3. *Mason J.* Lidar measurement of temperature: A new approach // Appl. Opt. 1975. V. 14, N 14. P. 76–78.
4. *Agroskin V.Y., Bravy B.G., Chernyshev Y.A., Kirianov V.I., Makarov E.F., Papin V.G., Sotnichenko S.A., Vasiliev G.K.* Multifrequency sounding with DF-laser-based lidar system: preliminary results // Proc. SPIE. 2004. V. 5416. P. 204–212.
5. *Basov N.G., Ionin A.A., Kotkov A.A., Kurnosov A.K., McCord J.E., Napartovich A.P., Seleznev L.V., Turkin N.G., Hager G.D.* Pulsed laser operating on the first overtone of the CO molecule in the 2.5–4.2 μm range. II. Frequency-selective regime // Quant. Electron. 2000. V. 30, N 10. P. 859–872.
6. *Харченко О.В.* Методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 523–528.
7. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
8. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Опτικο-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.