

УДК 551.510.532; 551.501.816

*О.А. РОМАНОВСКИЙ\**, *О.В. ХАРЧЕНКО\**, *С.В. ЯКОВЛЕВ\**, *\*\****ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОВОЛНОВЫХ ИК-ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ЛИДАРНЫХ И ТРАССОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ<sup>1</sup>**

Представлен алгоритм планирования и проведения лидарных и трассовых измерений метеорологических параметров атмосферы. Найдены длины волн, перспективные для измерения влажности и температуры атмосферы на тропосферных трассах. Выполнен расчет лидарных сигналов для определения профилей влажности и случайных ошибок восстановления профилей влажности и температуры с помощью предложенных длин волн с использованием в качестве источника излучения обертонового СО-лазера. Показана возможность определения фоновых концентраций водяного пара на коротких трассах с использованием Sr-лазера.

*Ключевые слова:* лидар, атмосфера, метеорологические параметры, ИК-лазер.

**Введение**

Развитие методов измерения профилей основных метеорологических элементов без запуска шаров-зондов представляет значительный практический интерес. Лидарные методы измерения метеорологических параметров атмосферы в настоящее время находят все большее применение. Причем из всех лидарных методов измерения профилей метеорологических параметров (таких, как температура и влажность) можно выделить метод дифференциального поглощения (МДП), имеющий наибольшую чувствительность по сравнению с другими методами (комбинационное рассеяние, резонансная флуоресценция) [1].

С одной стороны, при проведении измерений профилей влажности и температуры по МДП может использоваться целый ряд полос поглощения водяного пара в ближней и средней ИК-области спектра [2–4]. С другой стороны, в этих спектральных диапазонах реализованы высокоэффективные многоволновые лазеры на парогазовых активных средах, прежде всего обертоновый СО-лазер [5–7] и лазер на парах стронция [8], являющиеся перспективными источниками излучения для лидарных измерений. В связи с этим является актуальным исследование возможностей применения обертонового СО-лазера и Sr-лазера для дистанционного зондирования метеорологических параметров атмосферы методом дифференциального поглощения.

Целью данной работы является разработка алгоритма планирования и проведения лидарных и трассовых измерений метеорологических параметров атмосферы, поиск с его помощью информативных длин зондирования и выработка на основе численного моделирования требований к параметрам метеорологического лидара.

**Алгоритм планирования и проведения лидарных измерений**

На практике в метеорологических лидарах имеется возможность реализации как двухчастотного [9], так и трехчастотного метода дифференциального поглощения [10–13] для зондирования профилей влажности и температуры. При измерении профилей влажности в двухчастотном методе одна линия излучения совмещается с линией поглощения водяного пара, а вторая располагается в ближайшем «микрорекне прозрачности».

Для зондирования профилей водяного пара выбирается линия поглощения H<sub>2</sub>O с минимальной температурной зависимостью, а профили влажности, как известно из [14], определяются из соотношения

$$\rho(h) = \frac{\alpha_1(h)}{K_1(h) - K_0(h)}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашения № 14.604.21.0046 и 14.604.21.0100), РФФИ (грант № 13-05-98074-р\_сибирь-а), гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5 и Российского научного фонда (соглашение № 14-27-00022 в части проведения численного моделирования лидарного зондирования).

где 
$$\alpha_1(h) = \frac{1}{2\Delta h} \ln \left( \frac{U_1(h)U_0(h+\Delta h)}{U_1(h+\Delta h)U_0(h)} \right); \quad (2)$$

$K_i(h)$  – значения коэффициентов поглощения вдоль трассы зондирования в точке  $h$  на длинах волн в центре ( $i = 1$ ) и вне контура ( $i = 0$ ) выбранной линии поглощения водяного пара, рассчитываемой на основе априорной информации о распределении термодинамических параметров атмосферы и спектрального состава лазерного излучения;  $U_i(h)$  и  $U_i(h + \Delta h)$  – регистрируемые фотодетектором лидарные сигналы из зондируемых объемов атмосферы, удаленных на расстояние  $h$  и  $h + \Delta h$  от лидара на соответствующих длинах волн. Следует отметить, что априорный расчет коэффициентов поглощения приводит к систематическим ошибкам, подробный анализ которых и пути минимизации приведены в работах [14, 15].

При зондировании температуры двухчастотным методом выбирается линия поглощения кислорода с максимальной температурной чувствительностью. Профиль температуры при зондировании по двухчастотному методу может быть получен исходя из следующего соотношения [9]:

$$T(h) = T_m(h) \left[ 1 + \left( \frac{1.439E''}{T_m(h)} - 3/2 \right)^{-1} \ln \left( \frac{\alpha_1(h)}{q_0(1-q^*)K_1(h)b_m(h)} \right) \right], \quad (3)$$

где  $T_m(h)$  – модельный высотный профиль температуры;  $E''$  – энергия нижнего состояния поглощающего перехода;  $q_0 = 0.2095$  – объемное содержание кислорода в сухой атмосфере;  $q^*$  – объемное содержание водяного пара, взятое либо из данных лидарных измерений, либо из атмосферной модели;  $b_m(h)$  – модельный профиль плотности воздуха.

В трехчастотной схеме зондирования две линии излучения лазера строго совмещаются с двумя достаточно близкими линиями поглощения водяного пара с различной температурной зависимостью, а третья линия излучения расположена в ближайшем «микроокне прозрачности».

Профиль температуры может быть получен из следующего соотношения [10]:

$$T(h) = T_0 \frac{A}{\ln C - \ln E(h)}, \quad (4)$$

где 
$$A = \frac{E_1'' - E_2''}{kT_0}, \quad C = \frac{S_{01}\gamma_{02}}{S_{02}\gamma_{01}} \exp(A), \quad E(h) = \frac{\alpha_1(h)}{\alpha_2(h)}, \quad (5)$$

$E_j''$ ,  $S_{0j}$ ,  $\gamma_{0j}$  – соответственно энергия нижнего колебательно-вращательного уровня, интенсивность и полуширина при температуре  $T_0$  и давлении  $P_0$  для первой и второй линий поглощения водяного пара ( $j = 1, 2$ ). Коэффициент ослабления  $\alpha_2(h)$  определяется аналогично  $\alpha_1(h)$ .

Полученные значения температуры далее используются для расчета профилей коэффициентов поглощения при определении профилей водяного пара по формуле (1).

Случайные ошибки восстановления влажности и температуры по двухчастотной методике при ограничении лидарного сигнала дробовыми шумами, что соответствует использованию в лидаре ФЭУ, работающих в аналоговом режиме, определяются следующим образом:

$$\delta_i(\rho) = \frac{1}{2\Delta h\alpha_i(h)\sqrt{n}} \left\{ \frac{cF(\lambda)}{2\Delta h} \sum_{j=1}^2 \left( \frac{1}{U_{ij}} + \frac{1}{U_{0j}} \right) \right\}^{0.5}; \quad (6)$$

$$\delta(T) = \frac{T_m(h)D_m(h)}{\sqrt{n}\Delta h\alpha_1(h)} \left\{ \frac{cF(\lambda)}{2\Delta h} \sum_{j=1}^2 \left( \frac{1}{U_{0j}} + \frac{1}{U_{1j}} \right) \right\}^{0.5}, \quad (7)$$

где 
$$D_m(h) = \left( \frac{1.439E''}{T_m(h)} - 3/2 \right)^{-1}, \quad F(\lambda) = \frac{h'c}{\chi\lambda}. \quad (8)$$

Здесь  $U_{i,j}$  – лидарные сигналы в центре ( $i = 1$ ) и вне контура ( $i = 0$ ) линии поглощения водяного пара или кислорода на расстоянии  $h$  ( $j = 1$ ) и  $h + \Delta h$  ( $j = 2$ ) от лидара;  $c$  – скорость света;  $h'$  – постоянная Планка;  $\chi$  – эффективность приемопередающей системы;  $n$  – количество импульсов лазерного излучения.

Случайные ошибки в трехчастотном методе для восстановления профилей температуры при ограничении дробовыми шумами определяются как

$$\delta(T) = \frac{T_m^2(h)}{\sqrt{n}AT_0} \left\{ \delta_1^2(\rho) + \delta_2^2(\rho) \right\}^{0.5}. \quad (9)$$

Формулы (1) – (9) заложены в основу алгоритма планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы (рис. 1).

Алгоритм можно разделить на три составляющие – поисковую, расчетную, а также блок обработки лидарных сигналов. Входными данными являются исследуемый метеорологический параметр (в нашем случае температура или влажность), пространственное разрешение лидарных измерений, тип трассы зондирования (горизонтальная, вертикальная или наклонная), ширина линии лазерного излучения и другие параметры при необходимости решения конкретной задачи.

Поиск длин волн зондирования осуществляется по следующим критериям:

- оптимальная энергия нижнего уровня состояния поглощающего перехода;
- отсутствие мешающего поглощения;
- наличие пригодного для зондирования окна прозрачности.



Рис. 1. Схема алгоритма планирования и проведения лидарных измерений метеопараметров атмосферы

В поисковом блоке самым большим по объему используемой памяти является атлас линий поглощения атмосферных газов [16]. Метеомодели взяты из [17], используется также информация об аэрозольном ослаблении, коэффициенте обратного рассеяния [18] и молекулярном рассеянии [19].

Расчетный блок позволяет решать следующие взаимосвязанные задачи:

- расчет коэффициентов поглощения и спектров пропускания атмосферы;
- численное моделирование зондирования профилей влажности и температуры;
- расчет систематических ошибок восстановления профилей метеопараметров;
- расчет случайных ошибок восстановления профилей метеопараметров;
- выработка требований к параметрам метеорологического лидара.

С учетом результатов численного моделирования и оценки погрешностей измерений производится выработка требований к метеорологическому лидару дифференциального поглощения (ширина линии лазерного излучения, частота повторения импульсов, точность измерения длины волны и др.). Используя данный алгоритм, можно найти длины волн, которые являются наиболее информативными с точки зрения как лидарных, так и трассовых измерений метеопараметров атмосферы методом дифференциального поглощения.

Описанный алгоритм был использован для поиска информативных длин волн зондирования метеопараметров атмосферы в средней ИК-области спектра. Рассматривались возможности использования в качестве источников лазерного излучения оберточного СО-лазера и Sr-лазера.

### Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы с использованием линий излучения оберточного СО-лазера

Спектральный диапазон длин волн 2.5–4.2 мкм, в котором расположены линии генерации оберточного СО-лазера [5], является наиболее информативным с точки зрения лидарных измерений профилей как основных газовых компонент, так и метеорологических параметров атмосферы [6, 7].

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 и способы организации линий излучения оберточного СО-лазера.

Таблица 1

Спектральные параметры линий поглощения водяного пара и способ организации линии излучения оберточного СО-лазера для зондирования профилей метеорологических параметров атмосферы

№ п/п	$\nu_{\text{полг}}, \text{см}^{-1}$ (вакуум)	$\nu_{\text{изл}}, \text{см}^{-1}$ (вакуум)	Лазерная линия	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	$S_0, \text{см}/\text{молек.}$	$\gamma, \text{см}^{-1}$	$E'', \text{см}^{-1}$
1	3017.10530	3017.1651	P5	0.060	$2.016e^{-25}$	0.0799	2392.592
2	3013.91523	3013.89052	P6	0.024	$1.077e^{-24}$	0.0971	210.799
3	3006.97480	3006.91035	P8	0.064	$2.731e^{-25}$	0.0933	1813.788
4	-	2999.78241	P10	-	-	-	-

Для зондирования профилей влажности может быть использована линия № 2 с энергией нижнего состояния около  $210 \text{ см}^{-1}$ , которая позволяет минимизировать влияние вариаций температуры на ошибки расчета коэффициента поглощения. В качестве референтной частоты (off line) может быть использована линия излучения оберточного 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  $\Delta E''$ .

На рис. 2 представлены спектры поглощения атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации оберточного СО-лазера. Из табл. 1 и рис. 2 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.

Таким образом, в результате поиска, используя алгоритм отбора (рис. 1), определены длины волн для лидарных измерений метеорологических параметров атмосферы в диапазоне генерации оберточного СО-лазера в средней ИК-области спектра.

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

Расчеты проводились для условий ночной атмосферы и чистого неба. Пространственное разрешение бралось равным 500 м. Профили коэффициентов поглощения рассчитывались для фойгтовского контура с учетом поглощения крыльями соседних линий для летней и зимней атмосферных моделей средних широт [17]. Коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния и аэрозольного поглощения взяты из модели [19]. Входные данные для проведения численного моделирования представлены в табл. 2.

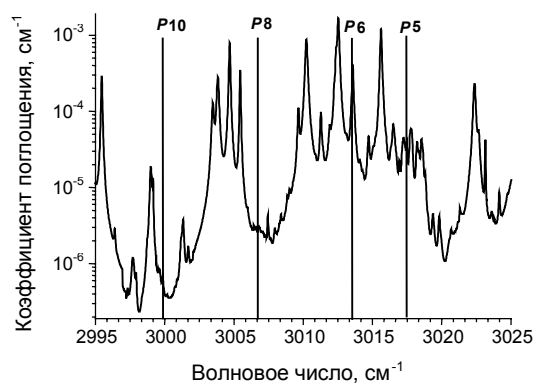


Рис. 2. Спектры поглощения атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации оберточного СО-лазера

Таблица 2  
**Входные данные для проведения численного моделирования лидарного зондирования метеопараметров атмосферы с помощью обертонового СО-лазера**

Параметр лидарной системы	Значение параметра
Площадь приемника $A_{пр}$ ( $D = 0.3$ м)	$700 \text{ см}^2 = 7 \cdot 10^{-8} \text{ км}^2$
Ширина аппаратной функции	$0.01 \text{ см}^{-1}$
Эффективность приемной системы	0.3
Пространственное разрешение $\Delta R$	0.5 км
Пиковая мощность лазера	$20 \cdot 10^3$ Вт
Диапазон перестройки лазера	2.5–4.2 мкм
Коэффициент обратного аэрозольного рассеяния $\beta_{\pi}$	$2.3 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$
NEP фотодетектора	$1 \cdot 10^{-9}$ Вт

На рис. 3 представлены рассчитанные для вертикальных трасс для летней (а) и зимней (б) атмосферных моделей соответственно пространственно и спектрально разрешенные лидарные эхосигналы в области выбранных длин волн зондирования метеорологических параметров атмосферы. Видно, что во всем рассматриваемом диапазоне высот 0–6 км уровень лидарных эхосигналов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника  $NEP = 10^{-9}$  Вт.

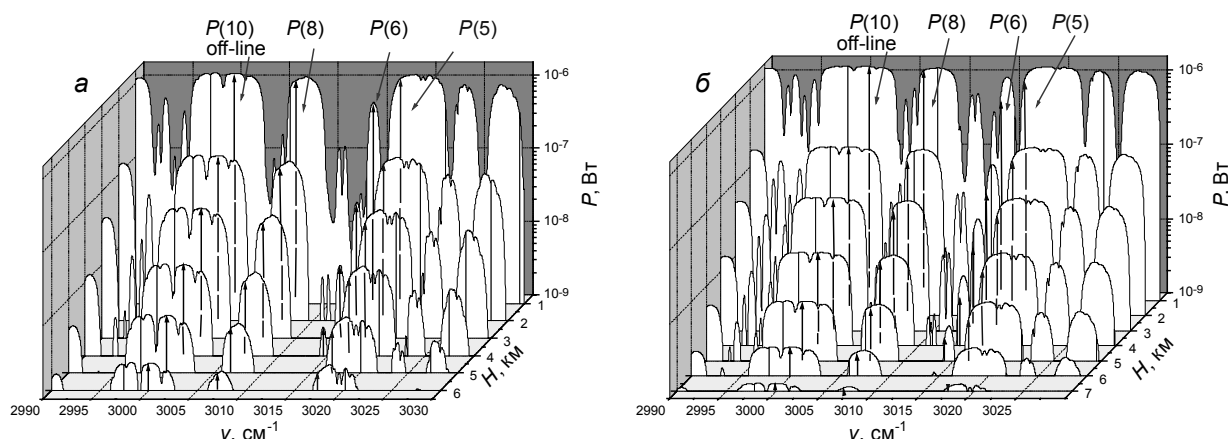


Рис. 3. Пространственно и спектрально разрешенные лидарные эхосигналы в области выбранных длин волн зондирования для летней (а) и зимней (б) моделей

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

Таблица 3  
**Случайные ошибки восстановления профилей влажности и температуры**

$H$ , км	Ошибки восстановления влажности, %		Ошибки восстановления 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	36	4.6	6.2
5.5	20	44	5.4	7.5
6	25	54	6.5	9

Проведенное моделирование показало, что лидар на основе обертонового СО-лазера с пиковой мощностью  $20 \cdot 10^3$  Вт обеспечивает дистанционное зондирование вертикальных профилей влаж-

ности 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.

Случайные ошибки восстановления температуры составляют менее 1 К в диапазоне высот 0–2.5 км летом и 0–2 км зимой.

### Результаты моделирования лидарных измерений профилей влажности атмосферы с использованием линий излучения Sr-лазера

Sr-лазер является эффективным источником излучения в ИК-области спектра (6.456; 3 и 1 мкм) [8]. Для определения профилей влажности атмосферы пригодны линии излучения 3 мкм диапазона длин волн. Чтобы определить возможность применения излучения многоволнового Sr-лазера для зондирования водяного пара в данном диапазоне, были рассчитаны спектры пропускания атмосферы. При расчете использовались данные о спектральных параметрах линий поглощения основных атмосферных газов [16] для приземной трассы зондирования длиной 1 км и стандартной модели атмосферы лета средних широт. Результаты этих расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Длина волны, волновое число, интенсивность линий излучения Sr-лазера и пропускание на них для 1 км приземной трассы зондирования

Длина волны в воздухе, мкм	Длина волны в вакууме, мкм	Волновое число в вакууме, $см^{-1}$	Интенсивность излучения лазера, отн. ед.	Пропускание на 1 км трассе (водяной пар)
1.0330	1.0332	9677.909	12000	0.99988
1.0914	1.0917	9160.026	10000	0.99964
2.6915	2.6922	3714.387	100000	0
2.9225	2.9233	3420.795	125000	0
3.0110	3.0118	3320.250	140000	0.64634

На рис. 4 представлены спектры пропускания атмосферы на трассах длиной 1–100 м и положение линий излучения Sr-лазера в области спектра 2.6915 и 2.9225 мкм. При этом линии излучения с центрами 1.0330 и 1.0914 мкм можно использовать в качестве референтной частоты. Видно, что использование линий поглощения водяного пара и совпадающих с ними линий генерации Sr-лазера 2.6915 и 2.9225 мкм дает возможность определять фоновые концентрации водяного пара на трассах длиной до 100 м.

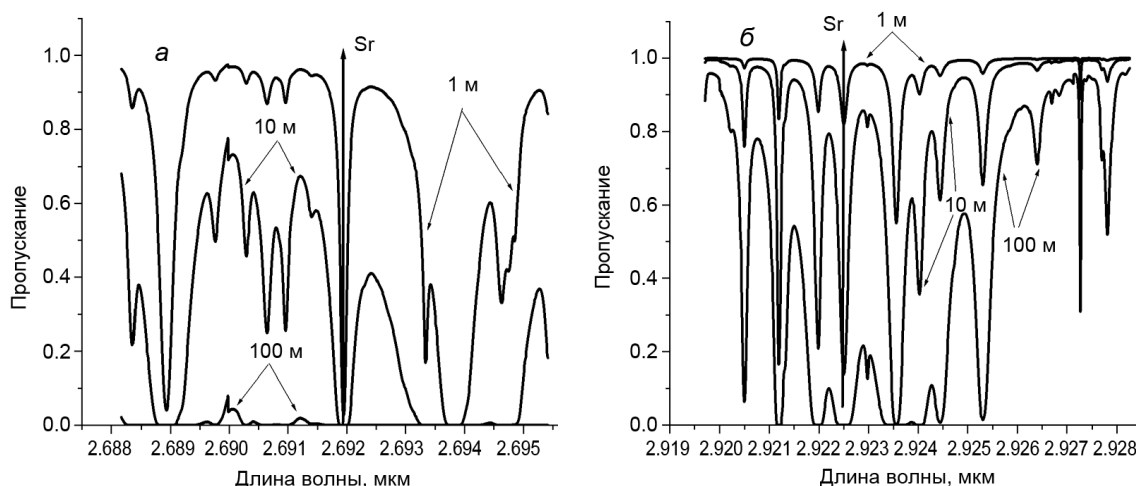


Рис. 4. Спектр пропускания атмосферы на 1–100 м приземной трассы и положение линий излучения Sr-лазера в области сильной линии поглощения водяного пара в области 2.69 мкм (а) и 2.92 мкм (б)

### Заключение

Результаты применения для моделирования разработанного алгоритма отбора длин волн зондирования подтверждают перспективность измерений профилей метеорологических параметров

атмосферы при реализации метода дифференциального поглощения с использованием многоволновых ИК-лазеров. Для выбранных линий поглощения водяного пара в области генерации обертонового СО-лазера и лазера на парах стронция проведена оценка возможностей зондирования влажности на приземных атмосферных трассах. Данные, полученные в ходе моделирования, могут быть использованы для определения профилей влажности до 5 км летом и 3 км зимой с помощью линий излучения обертонового СО-лазера и расчета фоновой концентрации водяного пара на коротких трассах до 100 м с помощью лазера на парах стронция. Приведены результаты расчета случайных ошибок восстановления профилей влажности и температуры с помощью предложенных длин волн с использованием в качестве источника излучения обертонового СО-лазера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межерис Р. М. Лазерное зондирование атмосферы. – М.: Мир, 1987.
2. Зуев В. В., Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Харченко О. В. // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10. – № 03. – С. 316–321.
3. Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Харченко О. В. // Журн. прикл. спектр. – 2000. – Т. 67. – № 6. – С. 693–695.
4. Андреев Ю. М., Гейко П. П., Матвиенко Г. Г. и др. // Прикладная физика. – 2003. – № 4. – С. 99–104.
5. Басов Н. Г., Ионин А. А., Котков А. А. и др. // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 10. – С. 859–872.
6. Ионин А. А., Климачев Ю. М., Козлов А. Ю. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 11. – С. 85–92.
7. Ионин А. А., Климачев Ю. М., Козлов А. Ю. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 08. – С. 702–707.
8. Солдатов А. Н., Филонов А. Г., Полунин Ю. П., Васильева А. В. // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 08. – С. 666–668.
9. Kalshoven J. E., Korb C. L., Schwemmer G. K., and Dombrovsky M. // Appl. Opt. – 1981. – V. 21. – No. 11. – P. 921–930.
10. Mason J. // Appl. Opt. – 1975. – V. 14. – No. 14. – P. 76–78.
11. Wulfmeyer V. // Appl. Opt. – 1998. – V. 37. – No. 18. – P. 3804–3824.
12. Bosenberg J. // Appl. Opt. – 1998. – V. 37. – No. 18. – P. 3845–3860.
13. Browell E. V., Ismail S., and Grant S. W. // Appl. Phys. B. – 1998. – V. 67. – No. 4. – P. 399–410.
14. Schotland R. M. // Proc. Third Sympos. on Remote Sens. of the Environ. – Michigan: Ann Arbor, 1964. – P. 215–224.
15. Романовский О. А. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 68–73.
16. Rothman L. S., Gordon I. E., Barbe A., et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2009. – V. 110. – No. 9. – P. 533–572.
17. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 264 с.
18. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. – Новосибирск: Наука, 1982. – 199 с.
19. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A., et al. // Report AFCRL-71-0297. – Bedford, Mass., 1971. – 86 p.

\*Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

E-mail: roa@iao.ru; olya@iao.ru; ysv@iao.ru

Поступила в редакцию 21.03.14,  
после доработки – 29.07.14.