

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

В.В. Зуев, Г.Г. Матвиенко, О.А. Романовский, О.В. Харченко

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ЛИДАРА МЕЛ-01**

Приведены результаты численного моделирования лазерного зондирования температуры и влажности атмосферы методом дифференциального поглощения в ближней ИК-области спектра (полосы поглощения водяного пара 0,72 и 0,94 мкм и кислорода 0,76 мкм) с использованием метеорологического лидара МЕЛ-01. Показаны возможности реализации как двухчастотного, так и трехчастотного метода зондирования метеопараметров.

Произведен выбор линий поглощения водяного пара и кислорода, пригодных для зондирования профилей температуры и влажности в нижней тропосфере. Показано, что случайные ошибки восстановления влажности не выходят за пределы 10% в диапазоне высот 0 – 1,8 км, а температуры за пределы 0,5 К для высот 0 – 1,2 км.

Метеорологический лидар МЕЛ-01 [1, 2] предназначен для дистанционного зондирования практически всех основных метеопараметров атмосферы, а именно: температуры, влажности, скорости и направления ветра. Длина волны излучения лазерного передатчика лидара МЕЛ-01 на основе лазера на сапфире с титаном может перестраиваться в трех спектральных диапазонах: (730±6), (766±6) и (940±6) нм, которые охватывают известные полосы поглощения водяного пара 0,72 и 0,94 мкм и кислорода 0,76 мкм. Некоторые основные параметры метеорологического лидара МЕЛ-01 приведены ниже.

Параметры метеорологического лидара МЕЛ-01

Энергия в импульсе лазерного излучения в области спектра	(730±6) нм	15 мДж
	(766±6) нм	30 мДж
	(940±6) нм	10 мДж
Ширина линии лазерного излучения		0,03 см ⁻¹
Точность измерения длины волны		0,2 пм
Частота повторения импульсов		30 Гц
Пропускание приемопередающей оптики		0,6
Диаметр приемного телескопа		300 мм
Эффективность ФЭУ		0,02

В лидаре имеется возможность реализации как двухчастотного, так и трехчастотного методов зондирования метеопараметров. При двухчастотном методе одна линия излучения совмещается с линией поглощения водяного пара или кислорода, а вторая располагается в ближайшем «микроокне прозрачности».

Для зондирования профилей водяного пара выбирается линия поглощения Н₂О с минимальной температурной зависимостью, а профили влажности, как известно [3], определяется из соотношения

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

где

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

$K_i(h)$ – зависимость от высоты коэффициента поглощения на длинах волн в центре ($i = 1$) и вне контура ($i = 0$) выбранной линии поглощения водяного пара, рассчитываемая на основе апри-

орной информации о распределении термодинамических параметров атмосферы и спектрального состава лазерного излучения; $U_i(h)$ и $U_i(h + \Delta h)$ – принимаемые лидарные сигналы из зондируемых объемов атмосферы, удаленных на расстояние h и $h + \Delta h$ от лидача на соответствующих длинах волн.

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 [4, 5]:

$$T(h) = T_m(h) \left[1 + \left(\frac{1,439E''}{T_m(h)} - 3/2 \right) \ln \left(\frac{\alpha_1(h)}{q_0(1 - q^*)K_1(h)b_m(h)} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

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 [6]:

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

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_1'' , S_{0j} , γ_{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 $\alpha_1(h)$ (выражение (2)).

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

На основе критериев, выработанных в [1, 6–8], был произведен выбор линий поглощения водяного пара и кислорода, пригодных для зондирования профилей температуры и влажности в нижней тропосфере в диапазонах излучения лазерного передатчика лидача МЕЛ-01(730±6), (766±6) и (940±6) нм. Спектральные параметры выбранных линий поглощения водяного пара и кислорода, взятые из атласа спектральных линий [9], приведены в табл. 1. Расчеты спектров ослабления лазерного излучения в этих спектральных областях показали, что выбранные линии поглощения кислорода и водяного пара являются изолированными и достаточно мощными.

Таблица 1

Спектральные параметры линий поглощения кислорода и водяного пара и длины воли лазерного излучения в линиях и вне линий поглощения

N	Газ	λ , нм	ν , см ⁻¹	S_0 , см/г	γ_0 , см ⁻¹	E'' , см ⁻¹
1	O ₂	768,3802	13014,3905	0,00365	0,042	1085,206
2	O ₂	768,2760	13016,1504	0,00365	0,042	1085,206
3	O ₂	768,3200	13015,4102	–	–	–
4	H ₂ O	725,7947	13778,0009	0,26100	0,116	95,176
5	H ₂ O	725,7378	13779,0811	0,16300	0,097	610,341
6	H ₂ O	727,9392	13737,4102	0,72700	0,111	224,838
7	H ₂ O	725,7600	13778,6596	–	–	–
8	H ₂ O	940,0080	10638,2073	1,22000	0,092	142,279
9	H ₂ O	940,2617	10635,3369	0,77700	0,086	552,912
10	H ₂ O	940,1000	10637,1663	–	–	–

Как показано в [1, 7], оптимальными для зондирования профилей влажности в нижней тропосфере являются линии поглощения водяного пара с энергиями нижнего состояния около 200–225 см⁻¹ и интенсивностями 0,1–0,7 в зависимости от различных климатических зон. Из табл. 1 видно, что этим требованиям отвечает линия 6.

При зондировании температуры по двухчастотной методике требуется достаточно сильная линия поглощения кислорода с высоким значением энергии нижнего состояния [8]. Этим требованиям соответствует линия 1.

Приведенные в табл. 1 пары линий 4–5 и 8–9 подходят для реализации трехчастотной методики, так как, согласно [6], требуются пары линий поглощения водяного пара с наибольшей разницей значений энергии нижнего состояния.

Систематические ошибки, возникающие за счет погрешностей предварительного расчета профиля эффективного коэффициента поглощения, зависят от многих факторов, к которым относятся вариации метеопараметров и концентраций газов вдоль трассы зондирования, сдвиг центров линий поглощения атмосферных газов давлением воздуха, доплеровское уширение обратнорассеянного сигнала от хаотично движущихся молекул воздуха. Влияние этих факторов на результаты зондирования и пути его минимизации, в том числе и для рассматриваемых нами спектральных диапазонов, проанализированы в работах [7, 8].

В данной статье рассматриваются случайные ошибки восстановления профилей температуры и влажности.

Для двухчастотного метода при ограничении лидарного сигнала дробовыми шумами, что соответствует использованию в лидаре МЕЛ-01 ФЭУ, работающих в аналоговом режиме, случайные ошибки восстановления влажности и температуры определяются следующим образом:

$$\delta_i(\rho) = \frac{1}{2\Delta h \alpha_i(h)\sqrt{n}} \left\{ \frac{cF(\lambda)}{2\Delta h} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{1}{U_{ij}} + \frac{1}{U_{0j}} \right) \right\}^{0,5}, \quad (6)$$

$$\delta(T) = \frac{T_m(h) D_m(h)}{\sqrt{n} \Delta h \alpha_i(h)} \left\{ \frac{cF(\lambda)}{2\Delta h} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{1}{U_{ij}} + \frac{1}{U_{0j}} \right) \right\}^{0,5}, \quad (7)$$

где

$$D_m(h) = \left(\frac{1,439E^n}{T_m(h)} - 3/2 \right)^{-1}; \quad F(\lambda) = \frac{h'}{\chi\lambda}. \quad (8)$$

Здесь U_{ij} – 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; χ – эффективность приемопередающей системы; n – количество импульсов лазерного излучения.

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

$$\delta(T) = \frac{T_m^2(h)}{\sqrt{n} AT_0} \{ \delta_1^2(\rho) + \delta_2^2(\rho) \}^{0,5}. \quad (9)$$

Расчеты проводились для условий ночной атмосферы и чистого неба. Пространственное разрешение бралось равным 200 м, время измерения 5 мин. Профили коэффициентов поглощения рассчитывались для фойгтовского контура с учетом поглощения крыльями соседних линий для трех атмосферных моделей: тропики, лето средних широт и зима арктических широт [10]. Коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния и аэрозольного поглощения взяты из модели [10], а профили индикатрисы рассеяния из модели [11].

Результаты численных оценок для выбранных длин волн зондирования в участках спектра 0,72, 0,76 и 0,94 мкм приведены в табл. 2а (ошибки по влажности $\delta(\rho)$, %) и 2б (ошибки по температуре $\delta(T)$, К).

Проведенные расчеты показали, как видно из табл. 2а, что при использовании для зондирования профилей водяного пара линий поглощения из полосы 0,72 мкм во всех климатических зонах ошибки восстановления влажности не превышают 10% до высот 1,8 км. Зондиро-

вание влажности в полосе поглощения 0,94 мкм менее эффективно, даже в условиях зимы арктических широт.

Таблица 2а

Ошибки восстановления влажности, %

h, км	Длина волны, нм								
	725,79			727,93			940,26		
	Тропики	Лето средних широт	Зима арктических широт	Тропики	Лето средних широт	Зима арктических широт	Тропики	Лето средних широт	Зима арктических широт
0,2	0,19	0,25	2,06	0,15	0,15	0,80	0,26	0,20	0,94
0,4	0,49	0,57	4,00	0,59	0,46	1,59	1,29	0,77	1,93
0,6	0,97	1,09	6,31	1,83	1,22	2,54	5,13	2,38	3,07
0,8	1,77	1,88	8,99	5,10	2,86	3,69	17,90	6,50	4,46
1,2	3,00	3,03	11,85	12,73	6,09	4,97	55,11	15,85	5,98
1,4	4,65	4,50	15,24	28,46	11,77	6,51	>100	34,73	7,91
1,6	6,97	6,48	18,96	60,91	21,74	8,34	—	72,24	10,15
1,8	10,34	9,25	23,40	>100	39,12	10,56	—	>100	12,95

Таблица 2б

Ошибки восстановления температуры $\delta(T), K$

h, км	Длина волны, мкм								
	0,72			0,76			0,94		
	Тропики	Лето средних широт	Зима арктических широт	Тропики	Лето средних широт	Зима арктических широт	Тропики	Лето средних широт	Зима арктических широт
0,2	0,05	0,06	0,55	0,13	0,11	0,09	0,11	0,07	0,17
0,4	0,12	0,15	1,05	0,13	0,11	0,09	0,74	0,32	0,34
0,6	0,23	0,27	1,66	0,20	0,17	0,15	4,23	1,29	0,55
0,8	0,42	0,45	2,36	0,28	0,24	0,20	9,98	4,61	1,09
1,0	0,68	0,71	3,10	0,40	0,33	0,30	>10	>10	1,46
1,2	1,02	1,09	3,97	0,55	0,45	0,42	—	—	1,89

Проведенные расчеты показали, как видно из табл. 2а, что при использовании для зондирования профилей водяного пара линий поглощения из полосы 0,72 мкм во всех климатических зонах ошибки восстановления влажности не превышают 10% до высот 1,8 км. Зондирование влажности в полосе поглощения 0,94 мкм менее эффективно, даже в условиях зимы арктических широт.

Численное моделирование зондирования профилей температуры (см. табл. 2б) выявило преимущество использования двухчастотной методики в области спектра 0,76 мкм, где случайные ошибки практически не выходят за пределы 0,5 К для всех климатических зон в диапазоне высот 0–1,2 км.

Применение трехчастотной методики в области 0,72 мкм для условий тропиков и лета средних широт позволяет восстанавливать профиль температуры с точностью лучше 1 К для высот 0–1,2 км. Для условий зимы арктических широт трехчастотная методика практически не реализуется.

Таким образом, результаты численного моделирования зондирования профилей влажности и температуры атмосферы методом дифференциального поглощения в ближней ИК-области спектра с помощью метеорологического лидара МЕЛ-01 показали, что в летних условиях средних широт и в тропиках трехчастотный метод с использованием линий поглощения из полосы 0,72 мкм способен конкурировать с двухчастотным методом зондирования раздельно температуры и влажности. В зимних условиях, особенно в условиях арктических широт, практически реализуется только двухчастотный метод. Наконец, полоса поглощения 0,94 мкм слабо пригодна для зондирования в пограничном слое атмосферы.

1. Матвиенко Г. Г., Аршинов Ю. Ф., Гришин А. И. и др. // Труды XI Симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 1993. С. 130–136.
2. Гришин А. И., Матвиенко Г. Г., Харченко О. В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 11–12. С. 1572–1576.
3. Schotland R. M. // Proceedings of Third Symposium on Remote Sensing of the Environment. Michigan, Ann Arbor, 1964. P. 215–224.
4. Mason J. // Appl. Optics. 1975. V. 14. N 14. P. 76–78.

5. Kalshoven J.E., Korb C.L., Schwemmer G.K., and Dombrovsky M. // *Appl. Optics*. 1981. V. 21. N 11. P. 921–930.
6. Endeman M., Byer R.L. // *Opt. Letters*. 1980. V. 5. N 10. P. 452–454.
7. Зуев В.В., Романовский О.А. К учету систематических погрешностей в лидарном методе дифференциального поглощения. М., 1987. 45 с. Деп. в ВИНТИ 25.06.87. N 46756–B87.
8. Korb C.L., Schwemmer G.K., Famiglietti J. e. a. Differential Absorption Lidars for Remote Sensing of Atmosphere Pressure and Temperature Profiles: Final Report. NASA Technical Memorandum 104618. Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland. 1995. 249 p.
9. Husson N., Chedin A., Scott N.E. e. a. // *Annal. Geophys.* 1986. Fasc. 2 Series A. P. 185–190.
10. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. e. a. Optical Properties of the Atmosphere. Report AFCRL-71-0297, AFCRL, Bedford, Mass., 1971. 86 p.
11. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
16 декабря 1996 г.

V.V. Zuev, G.G. Matvienko, O.A. Romanovsky and O.V. Kharchenko. **Numerical Simulation of Laser Sounding of Atmospheric Temperature and Humidity by Differential Absorption Method in Near IR Spectral Region with Meteorological Lidar MEL-01.**

The results of numerical simulation of laser sounding of atmospheric temperature and humidity by differential absorption method (DIAL) in near IR spectral region (absorption spectral bands of water vapor 0.72 and 0.94 μm and oxygen 0.76 μm) with meteorological lidar MEL-01 are presented. Possibilities of realisation of both two-frequency, and three-frequency of DIAL methods for the meteoroparameters sounded are shown. The selection of water vapor and oxygen absorption lines for sounding of temperature and humidity profiles in the lower troposphere is made. It is shown, that the random errors of restoration of humidity do not fall outside the 10% limit in a range heights of 0–1.8 km, and temperature 0.5 K for heights 0–1.2 km.