

УДК 551.501.5

Методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы

О.В. Харченко*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 20.01.2012 г.

Представлена методика планирования и проведения лидарных измерений по методу дифференциального поглощения профилей метеорологических параметров атмосферы. Методика апробирована в спектральных диапазонах генерации лазера на сапфире с титаном (диапазоны генерации в области 724; 760 и 0,934 нм) и обертоного СО-лазера с генерацией в области спектра 2500–4200 нм. Численное моделирование лидарных измерений метеопараметров атмосферы на выбранных длинах волн показало перспективность использования предложенной методики при проектировании метеолидаров.

Ключевые слова: лидар, поглощение, метеорологические параметры, атмосфера; lidar, absorption, meteorological parameters, atmosphere.

Введение

Лидарные методы измерения метеорологических параметров атмосферы, оказывающих большое влияние на оптические свойства аэрозоля, находят все более широкое применение. Лазерное зондирование атмосферы предлагает ряд методов дистанционного определения метеорологических параметров [1], основанных на взаимодействии лазерного излучения с естественными атмосферными полями.

Из всех лидарных методов измерения профилей температуры и влажности атмосферы наибольшую чувствительность имеет метод дифференциального поглощения (МДП), так как сечение резонансного поглощения значительно больше сечений взаимодействия комбинационного рассеяния и резонансной флуоресценции. При этом могут использоваться полосы поглощения кислорода в области 0,76 мкм и целый ряд полос поглощения водяного пара в видимой, ближней и средней ИК-областях спектра. Возникает задача поиска информативных длин волн зондирования метеопараметров атмосферы в различных спектральных диапазонах, а также выработки требований к лидарам дифференциального поглощения. Ранее был сделан выбор длины волны излучения [2], проведено численное моделирование, и показана перспективность использования метода дифференциального поглощения для исследования с помощью лидарных систем профилей метеорологических параметров в приземном слое атмосферы в безопасной для глаз области спектра 2 мкм [3].

В настоящей статье представлена методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы в видимой, ближней и средней ИК-областях спектра.

Методика планирования и проведения лидарных измерений

На практике в метеорологических лидарах имеется возможность реализации двухчастотного [4] и трехчастотного метода дифференциального поглощения для зондирования метеопараметров [5–8]. Двухчастотная методика с использованием линий поглощения кислорода в дальнейшем была модифицирована и реализована в лидарах, измеряющих профили температуры и давления [9–11].

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 H_2O с минимальной температурной зависимостью, а профиль влажности, как известно [12], 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

* Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru).

пара, рассчитываемая на основе априорной 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 лида 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]:

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

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 [5]:

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

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} , 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 используются для расчета 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

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

$U_{i,j}$ – 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 лида; 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

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

Соотношения (1)–(9) заложены в основу разработки методики планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы (рис. 1).

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

Поиск информативных длин волн зондирования осуществляется по следующим критериям:

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

В поисковом блоке самым большим по объему используемой памяти является атлас линий поглощения атмосферных газов [13]. Метеомодели взяты из [14], используется также информация об аэрозольном ослаблении, коэффициенте обратного рассеяния [15] и молекулярном рассеянии [16].

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 лида.



Рис. 1. Методики планирования и проведения лидарных измерений профилей температуры и влажности

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.). Результаты работы системы выводятся в виде таблицы информативных длин волн зондирования исследуемых метеопараметров по МДП.

Результаты поиска информативных длин волн зондирования

Описанная выше методика была применена для поиска информативных длин волн зондирования метеопараметров атмосферы в видимой, ближней и средней ИК-областях спектра. Рассматривались возможности использования в качестве источников лазерного излучения в метеолидаре лазера на сапфире с титаном (диапазоны генерации в области

724; 760 и 0,936 нм) [17] и обертонового СО-лазера с генерацией в области спектра 2500–4200 нм [18].

Длина волны излучения лазерного передатчика лидара 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 720 и 940 нм и кислорода 760 нм. Был произведен выбор линий поглощения водяного пара и кислорода, пригодных для зондирования профилей влажности и температуры в нижней тропосфере, результаты которого представлены в табл. 1.

На рис. 2 приведены спектры ослабления атмосферы в области выбранных длин волн зондирования. Видно, что эти линии поглощения кислорода и водяного пара являются изолированными и достаточно мощными.

Как показано в [19], оптимальными для зондирования профилей влажности в нижней тропосфере являются линии поглощения водяного пара с энергиями нижнего состояния E'' около $200\text{--}225\text{ см}^{-1}$

Таблица 1

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

N линии	Газ	λ , нм	ν , см^{-1}	S_0 , $\text{см}^2/\text{г}$	γ_0 , см^{-1}	E'' , см^{-1}
1	O ₂	768,5902	13010,8127	0,00365	0,033	1085,204
2	O ₂	768,4904	13012,5829	0,00350	0,032	1083,436
3	O ₂	768,5600	13011,4102	—	—	—
4	H ₂ O	725,5200	13783,1789	0,34538	0,121	70,091
5	H ₂ O	725,9402	13775,2991	0,16817	0,074	610,341
6	H ₂ O	725,7600	13778,6596	—	—	—
7	H ₂ O	940,0421	10633,5539	1,16513	0,173	42,0234
8	H ₂ O	940,5208	10632,4281	0,40937	0,068	552,911
9	H ₂ O	940,2560	10632,0663	—	—	—

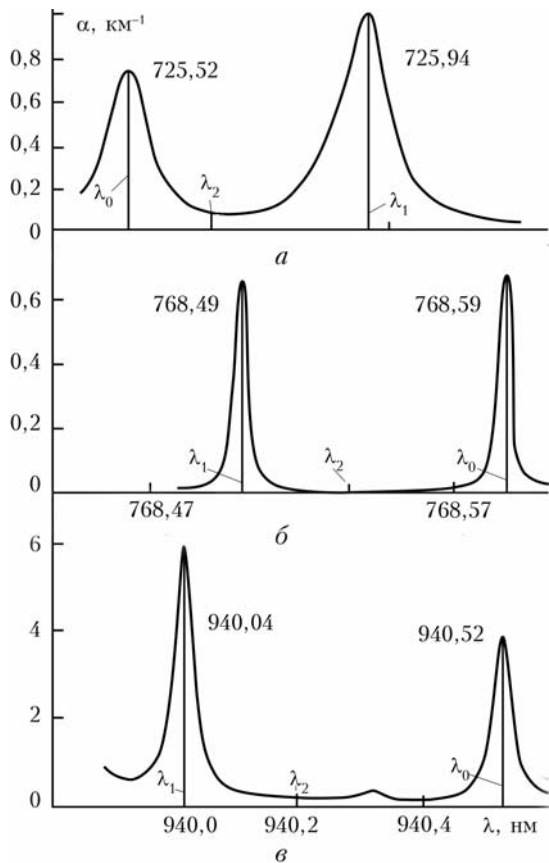


Рис. 2. Спектры ослабления атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации лазера на сапфире с титаном

и интенсивностями S_0 0,1–0,7 в зависимости от разных климатических зон. Из табл. 1 видно, что эти требованиям соответствует линии 4 или 5.

При зондировании температуры по двухчастотной методике требуется достаточно сильная линия поглощения кислорода с высоким значением энергии нижнего состояния [4]. Этим требованиям соответствует линия 1.

Приведенные в табл. 1 пары линий 4–5 и 7–8 подходят для реализации трехчастотной методики, так как, согласно [20], требуются пары линий поглощения с наибольшей разницей значений энергий нижнего состояния.

Результаты выбора линий поглощения водяного пара, приведенные для зондирования профилей влажности и температуры в нижней тропосфере в области генерации оберточного СО-лазера 2500–4200 нм, представлены в табл. 2. Здесь также указан способ организации линии излучения оберточного СО-лазера.

На рис. 3 представлены спектры пропускания атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации оберточного СО-лазера.

Из табл. 2 и рис. 3 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 с помощью разработанной методики определены информативные длины волн зондирования метеорологических параметров атмосферы в диапазоне генерации лазера на сапфире с титаном (видимая и ближняя ИК-области спектра) и оберточного СО-лазера (средняя ИК-область спектра).

Таблица 2

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

N линии	ν , см^{-1}	Способ организации	$\Delta\nu$, см^{-1}	S_0 , $\text{см}/\text{молек}$	γ_0 , см^{-1}	E'' , см^{-1}
1	3323,018880	P16 (19–17)	0,05	$4,231e^{-24}$	0,0988	275,497
2	3334,628890	P13 (19–17)	0,08	$1,315e^{-23}$	0,0642	1059,83540
3	3351,261930	P09 (19–17)	0,03	$1,789e^{-24}$	0,0945	542,90580
4	3025,760970	P16 (25–23)	0,07	$1,015e^{-23}$	0,1040	212,15640
5	2987,524850	P14 (26–24)	0,12	$6,163e^{-24}$	0,0753	610,34120

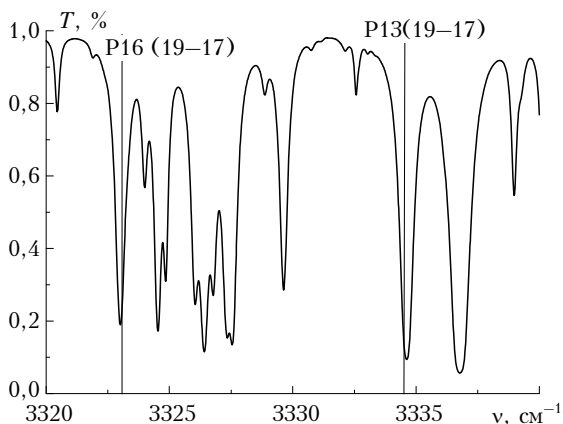


Рис. 3. Спектры пропускания атмосферы в области выбранных длин волн зондирования в диапазоне генерации оберточного СО-лазера

Результаты численного моделирования лидарного зондирования

Для оценки возможностей и выработки требований к метеолидару был проведен расчет случайных ошибок [соотношения (7)–(10)] восстановления профилей температуры и влажности с использованием предложенных длин волн в трех спектральных диапазонах (730 ± 6), (766 ± 6) и (940 ± 6) нм в области генерации лазера на сапфире с титаном.

При моделировании использовались следующие параметры метеолидара:

- 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
 Частота повторения импульсов 30 Гц
 Точность измерения длины волны 0,2 нм
 Пропускание приемопередающей оптики 0,6
 Диаметр приемного телескопа 300 мм
 Эффективность ФЭУ 0,02

Результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5.

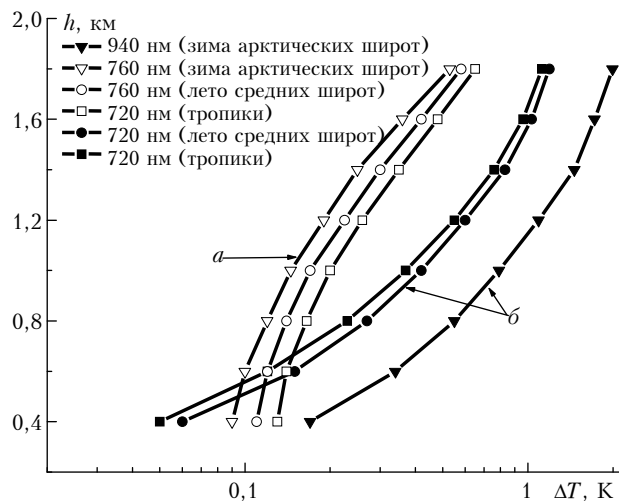


Рис. 4. Случайные ошибки восстановления температуры по двухчастотной (а) и трехчастотной методикам (б)

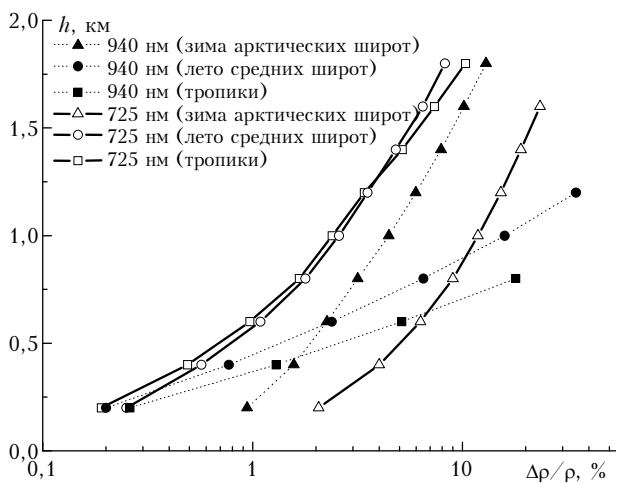


Рис. 5. Случайные ошибки восстановления влажности

Численное моделирование лидарного зондирования профилей температуры по МДП на выбранных длинах волн выявило преимущество использования двухчастотной методики в области спектра 760 нм, где случайные ошибки практически не выходят за пределы 0,5 К для всех климатических зон. В летних условиях средних широт и в тропиках трехчастотный метод с использованием линий поглощения из полосы 720 нм конкурентоспособен с двухчастотным методом зондирования. В зимних условиях, особенно в условиях арктических широт, трехчастотный метод реализуется только при использовании полосы поглощения 940 нм.

Для зондирования профилей водяного пара достоверность метода максимальна в зимнее время

при использовании полосы поглощения 940 нм, а в условиях тропиков и лета средних широт при использовании полосы 720 нм (ошибки восстановления влажности не превышают 10% до высот 2 км).

Заключение

Таким образом, разработанная методика планирования и проведения лидарных измерений успешно применена при проектировании метеолидара, работающего в нижней тропосфере по методу ДП в ближнем ИК-диапазоне спектра.

Следует отметить, что предложенная методика может применяться и в других диапазонах, например в средней ИК-области спектра. Для выбранных линий поглощения водяного пара (см. табл. 2) в области генерации оборотного СО-лазера была проведена оценка возможностей лидарного зондирования влажности для горизонтальных приземных трасс, которая показала, что уровень лидарных эхосигналов для дальностей до 3 км превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника $NEP = 10^{-9}$ Вт.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (госконтракты № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204 и 16.518.11.7067).

1. Межерис Р.М. Лазерное зондирование атмосферы. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Матвиенко Г.Г., Харченко О.В., Ярчук Т.А. Выбор длины волны излучения лидарных систем, функционирующих в безопасной для глаз области спектра // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 10. С. 1542–1544.
3. Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Харченко О.В. Моделирование лидарного зондирования метеопараметров атмосферы в области спектра 2 мкм // Ж. прикл. спектроскопии. С. 2000. Т. 67, № 6. С. 693–695.
4. Kalshoven J.E., Korb C.L., Schwemmer G.K., Dombrowsky M. Laser remote sensing of atmospheric temperature by observing resonant absorption of oxygen // Appl. Opt. 1981. V. 21, N 11. P. 921–930.
5. Mason J. Lidar measurement of temperature: A new approach // Appl. Opt. 1975. V. 14, N 14. P. 76–78.
6. Wulfmeyer V. Ground-Based Differential Absorption Lidar for Water-Vapor and Temperature Profiling: Development and Specifications of a High-Performance Laser Transmitter // Appl. Opt. 1998. V. 37, N 18. P. 3804–3824.
7. Bosenberg J. Ground-Based Differential Absorption Lidar for Water-Vapor and Temperature Profiling: Methodology // Appl. Opt. 1998. V. 37, N 18. P. 3845–3860.
8. Browell E.V., Ismail S., Grant S.W. Differential absorption lidar (DIAL) measurements from air and space // Appl. Phys. B. 1998. V. 67, N 4. P. 399–410.
9. Dombrowski M., Schwemmer G.K., Korb C.L. Lidar system for measuring atmospheric pressure and temperature // Proc. SPIE. 1990. V. 1222. P. 194.
10. Flamant C.N., Schwemmer G.K., Korb C.L., Evans K.D., Palm S.P. Pressure Measurements Using an Airborne Differential Absorption Lidar // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1999. V. 16, N 5. P. 561–574.
11. Riris H., Rodriguez M.D., Allan G.R., Hasselbrack W.E., Stephen M.A., Abshire J.B. Airborne lidar measurements of atmospheric pressure made using the oxygen A-band // Proc. SPIE. 2011. V. 8159. P. 815909.
12. Schotland R.M. The detection of the vertical profile of atmospheric gases by means of a ground-based optical

- radar // Proc. Third Simpos. on Remote Sens. Environ. Michigan: Ann Arbor, 1964. P. 215–224.
13. Rothman L.S., Jacquemart D., Chance K., Barbe A., Benner D.C., Devi V.M., Birk M., Wagner G., Brown L.R., Toth R.A., Carleer M.R., Auwers J. Vander, Chackerian C., Coudert L.H., Flaud J.-M., Hartmann J.-M., Orphal J., Perrin A., Dana V., Mandin J.-Y., Smith M.A.H., Gamache R.R., Goldman A., Jucks K.W., Maki A.G., Massie S.T., Rinsland C.P., Tennyson J., Tolchenov R.N., Varanasi P. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2005. V. 96. P. 139–204.
 14. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
 15. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.
 16. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. / Ed. by A. McIntyre. Optical properties of atmosphere // Report AFCRL-71-0297. Bedford, Mass., 1971. 86 p.
 17. Бартошевич С.Г., Бурлаков В.Д., Зуев В.В., Полушин Ю.П., Скрипко Г.А., Урбанович В.С. Мощный квазинепрерывный излучатель на кристалле $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, перестраиваемый в диапазоне 680–960 нм с накачкой лазером на парах меди // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 12. С. 87–93.
 18. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А., Курносов А.К., МакКорт Дж.Е., Напартович В.Д., Селезнев Л.В., Туркин Н.Г., Хагер Г.Д. Импульсный лазер на первом обертоном молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2,5–4,2 мкм. II. Частотно селективный режим генерации // Квант. электрон. 2000. № 10. С. 859–872.
 19. Романовский О.А. Анализ систематических ошибок восстановления лидарных профилей концентраций атмосферных газов методом дифференциального поглощения // Изв. вузов. Физ. 2008. № 6. С. 68–73.
 20. Endeman M., Byer R.L. Simultaneous remote measurements of atmospheric temperature and humidity using a continuously tunable infrared lidar // Opt. Lett. 1980. V. 5, N 10. P. 452–454.

O.V. Kharchenko. The method for planning and carrying out the lidar measurements of profiles of atmospheric meteorological parameters.

The method for planning and carrying out the differential absorption lidar measurements of the profiles of atmospheric meteorological parameters is developed. The method was tested in the spectral ranges of Ti-sapphire laser generation (ranges of generation are 0.72; 0.76; and 0.94 μm) and overtone CO laser generation in the wavelength region 2.5–4.2 μm . The numerical simulation of lidar measurements of atmospheric meteorological parameters at the selected wavelengths has shown that offered method could be used for designing the meteorological lidars.