

УДК 551.501

# Измерения метеорологической дальности видимости атмосферы лидарным и нефелометрическим методами

А.И. Гришин<sup>1</sup>, А.В. Крючков<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 29.01.2017 г.

Описываются сравнительные измерения метеорологической дальности видимости атмосферы с помощью лидара и нефелометра. Данные синхронных измерений свидетельствуют о хорошем совпадении результатов, полученных на разных приборах в определенных ситуациях. Коэффициент корреляции достигает величины 0,92.

*Ключевые слова:* атмосфера, лидар, коэффициент аэрозольного рассеяния, нефелометр; atmosphere, lidar, aerosol scattering coefficient, nephelometer.

## Введение

Исследованиям различных слоев атмосферы в последние годы уделяется все большее внимание в связи с такими общечеловеческими проблемами, как глобальное потепление, таяние арктических и антарктических льдов, опустынивание земель, стремительно растущее население Земли и т.д. Растет и парк приборов, используемых для исследования земной атмосферы [1–9].

В первую очередь следует отметить класс приборов для изучения атмосферы, использующих дистанционные методы. В оптическом диапазоне, включая УФ- и ИК-интервалы, в этот класс, наряду с другими приборами, попадают лидары [1, 13].

Современные лидары позволяют получать информацию в космических масштабах и производить мониторинг областей объемом в несколько сотен кубических километров с хорошим пространственным разрешением.

В то же время ряд задач атмосферной оптики требует локальных измерений конкретного параметра, в частности объемного коэффициента рассеяния или спектра размеров аэрозольных частиц. Примером используемых устройств могут служить датчики дальности видимости, устанавливаемые во многих аэропортах мира [6, 8, 13]. При этом возникает вопрос, насколько соответствуют друг другу данные, получаемые различными приборами, в случаях, когда действия приборов основаны на разных методах измерений.

В настоящей работе сравниваются результаты измерений параметров атмосферы, полученные одно-

временно с помощью измерителя метеорологической дальности видимости (ИМДВ) и измерителя высоты нижней границы облачности (ИВНГО).

## Измерительная аппаратура

Измеритель метеорологической дальности видимости представляет собой прибор для определения метеорологической дальности видимости (МДВ) по измерениям светового потока, рассеянного под углом 45°. В ряде источников [6, 13] показано, что данный световой поток пропорционален общему рассеянному потоку, т.е. численному значению коэффициента объемного рассеяния  $\sigma$ , для широкого класса метеорологических ситуаций. Таким образом, интенсивность попавшего на фотодетектор рассеянного под углом 45° светового потока  $F$  можно записать как

$$F = 4\pi F_0 k \beta_{45}, \quad (1)$$

где  $F_0$  — интенсивность излученного сигнала;  $k$  — аппаратная константа, зависящая от геометрии измерений и имеющая размерность эквивалентной длины рассеивающего объема;  $\beta_{45}$  — коэффициент направленного светорассеяния для угла 45°. Учитывая, что  $\beta_{45}$  и  $\sigma$  — пропорционально изменяющиеся величины [6, 13], запишем:

$$F = 4\pi F_0 k p \sigma = 5,8\pi F_0 k \sigma$$

( $p$  — коэффициент пропорциональности,  $p = 1,45$  для широкого класса метеоситуаций [6, 13]).

Однозначная связь между рассеивающими свойствами атмосферы и оптическим сигналом на фотоприемнике определялась при помощи калибровки прибора, подробно описанной в [10]. Для калибровки применялся специальный матовый светоотражаю-

\* Анатолий Иванович Гришин (aig@iao.ru); Александр Владимирович Крючков (kaw@iao.ru).

щий экран с угловой зависимостью интенсивности рассеянного света, близкой к ламбертовской [12], и очень малой зеркальной составляющей. Так как зондирование проводилось на длине волны 890 нм, а метеорологическая дальность видимости  $S_m$  определяется для  $\lambda = 550$  нм, то полученный сигнал корректировался с помощью соотношения Ангстрема [11, 13]:

$$\frac{\tau(\lambda_1)}{\tau(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-n}. \quad (2)$$

Здесь  $\tau(\lambda)$  – оптическая толщина для длины волны  $\lambda$ ;  $n$  – параметр Ангстрема [11, 13], для видимого диапазона можно принять  $n = 1,25$ .

Затем с помощью формулы Кошмидера [5] находится метеорологическая дальность видимости

$$S_m = 3/\sigma. \quad (3)$$

Измерения проводились с частотой 2 кГц и усреднялись за минутный временной интервал по 120000 реализаций. Это позволило минимизировать влияние случайных шумов. Ошибка определения  $S_m$  в выражении (3) носит в основном методический характер [6], при этом  $\Delta S_m/S_m = 0,10-0,14$ . Константа  $3 \approx |\ln(0,05)|$  соответствует минимальному значению контраста, которое различает человеческий глаз (5%). Весь процесс обработки и калибровки проводился в автоматическом режиме на базе процессора Atmega8.

Отметим, что в 2006 г. ИМДВ проходил сравнительные испытания в институте метрологии ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в Санкт-Петербурге, где в качестве образцового прибора использовался трансмиссометр LT31 MITRAS фирмы Vaisala [9]. Измерения показали хорошее согласие результатов, за исключением измерений в условиях снегопада, когда ошибки существенно возрастали.

Измеритель высоты нижней границы облачности – это лидар, работающий в режиме накопления сигналов с частотой повторения импульсов 20 кГц. В качестве источника излучения применяется лазерный диод, имеющий высокую надежность и большую наработку на отказ ( $\sim 10^5$  ч непрерывной работы). Сигнал из атмосферы усреднялся по пятиминутному интервалу, т.е. по 6 млн импульсов, что позволило минимизировать случайные ошибки измерений и, по сути, свести все ошибки к методическим (12–15%) [2, 6, 13].

Восстановление вертикального профиля коэффициента объемного рассеяния проводилось по методу Клетта [7] с выбором начальной точки в конце трассы:

$$\sigma(R) = \frac{S(R)}{\frac{S(R_{\max})}{\sigma(R_{\max})} + 2 \int_R^{R_{\max}} S(R) dR}, \quad (4)$$

где  $\sigma(R)$  – коэффициент объемного рассеяния на дистанции  $R$ ;  $S(R) = \frac{U(R)R^2}{kG(R)}$ ,  $U(R)$  – сигнал на фо-

топриемнике с расстояния  $R$ ,  $k$  – аппаратная константа,  $G(R)$  – геометрическая функция лидара;  $R_{\max}$  – максимальная дальность зондирования (конец зондируемой трассы). Выражение (4) – решение обыкновенного дифференциального уравнения Бернулли [7], хорошо зарекомендовавшее себя при измерениях в условиях шумов. Для измерений использовался первый, самый нижний строб ИВНГО, при этом к сигналу последовательно применялись выражения (2) и (3).

## Результаты сравнительных измерений

Измерения проводились в апреле 2008 г. в Лояне (КНР). Приборы были установлены рядом на измерительной площадке, которая располагалась в черте города на высоте 12 м над земной поверхностью. Измерения осуществлялись как в дневное, так и в ночное время. В этот период в районе измерений находилась антициклональная область с дневной температурой 22–25 °С; ночью температура опускалась до 10–14 °С. Рассеивающие характеристики атмосферы во время измерений менялись в довольно широких пределах. Результаты измерений атмосферных параметров представлены на рис. 1–2.

На рис. 1 приведены графики зависимости МДВ от времени. Измерения проводились в течение 10 ч. Из графика видно, что приземная МДВ во время измерений изменялась от 4 до 12 км, при этом две кривые отличаются в пределах ошибок измерений. Вертикальные отрезки показывают доверительные интервалы при доверительной вероятности 0,95. В данном случае измерения лидара (серая кривая) показывают меньший уровень флуктуаций измеряемого параметра. Это можно объяснить разными величинами рассеивающих объемов для лидара и ИМДВ ( $\sim 0,5$  м<sup>3</sup> и  $\sim 0,5$  дм<sup>3</sup> соответственно). Кроме того, время накопления сигнала лидара (5 мин) было существенно больше, чем нефелометра ИМДВ (1 мин).

На рис. 2 показаны зависимости МДВ от времени за более длительный период. Здесь интервал  $S_m$  составляет от 3 до 28 км, и везде обнаруживается четкое соответствие данных, полученных двумя приборами. Коэффициент взаимной корреляции, рассчитанный для этих двух кривых, равен 0,92. Обращает на себя внимание интересный факт: при низких значениях МДВ наблюдается некоторое превышение лидарных данных над соответствующими значениями, полученными с помощью ИМДВ; для высоких значений МДВ, наоборот, данные ИМДВ лежат выше значений, полученных с помощью лидара.

На наш взгляд, это можно объяснить, если принять во внимание особенности измерения рассеивающих свойств атмосферы двумя различными приборами. При высокой прозрачности в атмосфере присутствует *сравнительно* небольшое число крупных и гигантских частиц, поэтому индикатриса рассеяния становится более симметричной, а рассеяние в заднюю полусферу становится все более соизмеримым с рассеянием в переднюю полусферу. В предельном

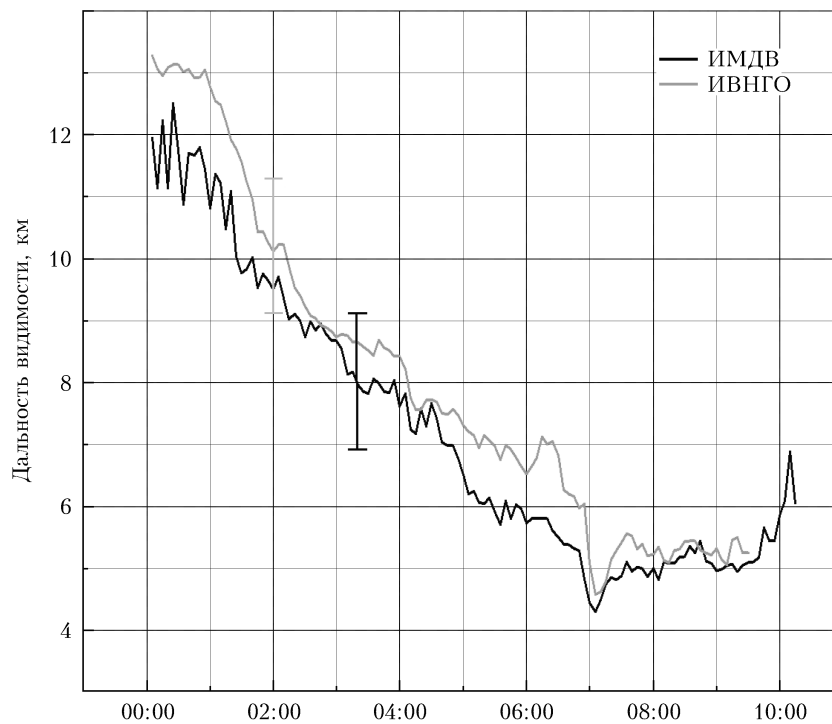


Рис. 1. Зависимость МДВ от времени

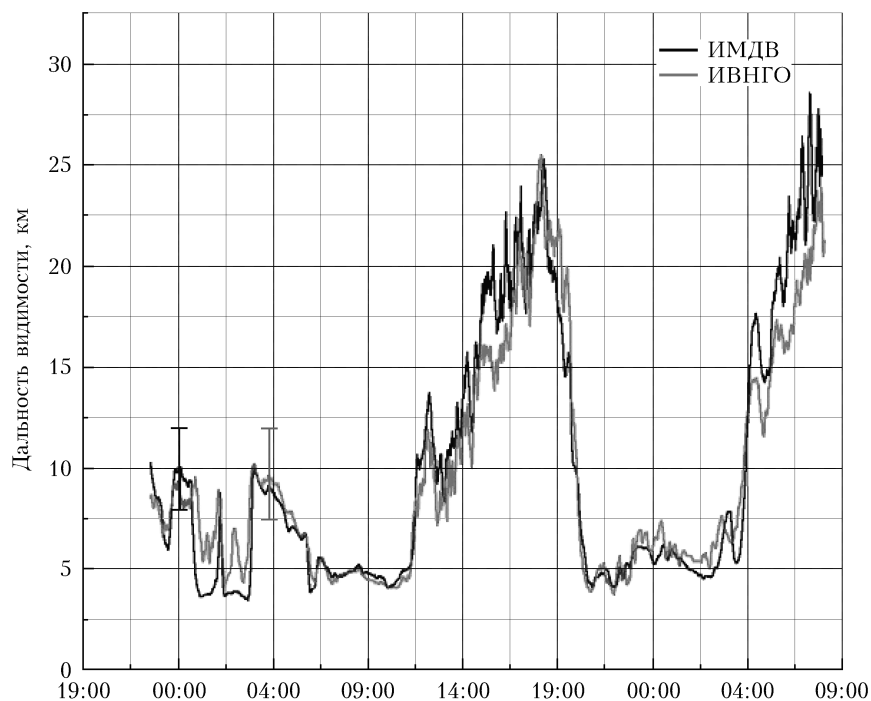


Рис. 2. Зависимость МДВ от времени

случае чисто молекулярной атмосферы рассеяние «вперед» и «назад» становится одинаковым. Этот факт никак не отражается на измерениях с помощью ИМДВ, где учитывается только рассеяние «вперед». Таким образом, при высоких значениях прозрачности измеритель дальности видимости выдает завышенные значения МДВ, что и наблюдается на рис. 2. Косвенным подтверждением служит то, что

флуктуации измеряемых значений МДВ в верхней части графика существенно больше, чем при низкой прозрачности в нижней части графика. Этот факт отмечался и раньше: чем выше прозрачность, тем больше флуктуации получаемых данных и, следовательно, растут погрешности приборов, использующих рассеяние «вперед» (например, РДВ-3, ФИ-1 и др.).

## Заключение

Выполненный в работе анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Совместные измерения метеорологической дальности видимости атмосферы двумя приборами показали, что в диапазоне дальностей видимости от 3 до 28 км ИМДВ и лидар показывают удовлетворительно согласованные результаты в конкретных условиях измерений.

2. Небольшие расхождения в данных двух приборов объясняются разными геометрическими схемами измерений, которые они используют.

3. Лидарные данные можно использовать для измерения метеорологической дальности видимости атмосферы. Следует, однако, заметить, что этот вывод справедлив лишь для определенных классов метеоситуаций, охваченных в представленных измерениях. При существенном изменении фазового состава частиц в атмосфере (например, при появлении в атмосфере грубодисперсной фракции в значительной концентрации) ошибки определения  $S_m$  становятся значительно большими.

1. *Зуев В.Е.* Лазер покоряет небо. Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1972. 191 с.
2. *Ковалев В.А.* Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 215 с.
3. *Базисный* фотометр: Пат. 2070717. Россия, МПК, G 01 J 1/44. Гончаров Ю.М., Волков О.А., Круглов Р.А.,

Персин С.М.; Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. № 93011375/25; Заявл. 03.03.1993; Оpubл. 20.12.1996.

4. *Базисный* фотометр: Пат. 83136. Россия, МПК, G 01 J 1/44. Волков О.А., Круглов Р.А., Денисенко С.А., Проценко В.А.; Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. № 83136; Заявл. 20.05.2009; Оpubл. 15.11.2009.
5. *Гаврилов В.А.* Видимость в атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1966. 313 с.
6. *Иванов А.П.* Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969. 592 с.
7. *Klett J.D.* Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 2. P. 211–220.
8. *Датчик* видимости Vaisala FS11 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vaisala.ru/ru/products/visibility-sensors/Pages/FS11.aspx> (дата обращения: 10.02.2016).
9. *Трансмиссометр* Vaisala LT31 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vaisala.ru/ru/products/visibility-sensors/Pages/LT31.aspx> (дата обращения: 10.02.2016).
10. *Pritchard B., Elliott W.* Two instruments for atmospheric optics measurements // J. Opt. Soc. Am. 1960. V. 50, N 3. P. 191–202.
11. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. М.: Мир, 1979. 421 с.
12. А.с. 320565 СССР, МПК C23d1/100. Способ обработки поверхности алюминия / Айолло Э.А., Гутников Б.Я., Слепова В.А., Смирнова К.А., Сокольский М.Н., Топорец А.С. Оpubл. в БИ. 1972. № 24.
13. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Современные проблемы атмосферной оптики. В 9 т. Т. 2. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1986. 256 с.

*A.I. Grishin, A.V. Kruchkov. Lidar and nephelometric measurements of meteorological range of visibility.*

Results of comparative measurements of the meteorological range of visibility in the atmosphere with the help of a lidar and a nephelometer are described. Data of the synchronous measurements show a good coincidence between the results obtained by different instruments in certain situations. The correlation coefficient attains 0.92.