

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-67-78

УДК 551.501

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВИДИМОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА

**С.Е. Иванов, Ю.В. Федотов, П.А. Филимонов,
М.Л. Белов, В.А. Городничев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: ekomonit@bmstu.ru; fed@bmstu.ru; belov@bmstu.ru; gorod@bmstu.ru

Описан лазерный измеритель характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей, работающий в видимом спектральном диапазоне на волне излучения длиной 532 нм и в ультрафиолетовом спектральном диапазоне на безопасной для глаз волне излучения длиной 355 нм. Приведены характеристики блоков лазерного измерителя и описана блок-схема алгоритма обработки результатов измерений. Представлены примеры типичного лазерного эхо-сигнала, обратно рассеянного атмосферой, и пространственно-временного распределения коэффициента вариации объема коэффициента обратного рассеяния атмосферы. Результаты многодневных измерений показывают, что размер регистрируемых аэрозольных неоднородностей в среднем составляет ~5 м, а коэффициент вариации может достигать значений ~3–6% для волны длиной 532 нм и ~1,2–2,1% для волны длиной 355 нм.

Ключевые слова: лазер, атмосфера, характеристики аэрозольных неоднородностей, видимый диапазон спектра, ультрафиолетовый диапазон спектра.

LASER METER OF ATMOSPHERIC AEROSOL INHOMOGENEITY PROPERTIES IN VISIBLE AND ULTRAVIOLET SPECTRAL BANDS

**S.E. Ivanov, Yu.V. Fedotov, P.A. Filimonov,
M.L. Belov, V.A. Gorodnichev**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: ekomonit@bmstu.ru; fed@bmstu.ru; belov@bmstu.ru; gorod@bmstu.ru

The purpose of this study was to describe laser meter of atmospheric aerosol inhomogeneity properties in visible spectral band for the wavelength of 532 nm and in UV spectral band for the eyes safe wavelength of 355 nm. We examine the parameters of laser meter units and describe control flow chart of processing measurement data. We illustrate the findings of the research with the examples of typical laser echo-signal from the atmosphere and spatio-temporal distribution of variability index of back scatter volume coefficient in atmosphere. Measurement data show that average aerosol inhomogeneity size equals ~5 m and variability index reach the value ~3–6% for the wavelength of 532 nm and ~1,2–2,1% for the wavelength of 355 nm.

Keywords: laser, atmosphere, aerosol inhomogeneity properties, visible spectral band, ultraviolet spectral band.

Разработка лазерных систем, предназначенных для работы в условиях земной атмосферы, требует достоверной информации о состоянии атмосферы. Аэрозольные лидары, предназначенные для оперативного мониторинга атмосферы, позволяют дистанционно определять характеристики атмосферного аэрозоля и облачных образований в атмосфере [1–6].

Большинство современных аэрозольных лидаров измеряют средние характеристики атмосферы и работают в видимом диапазоне. Однако научный и практический интерес представляют флуктуационные характеристики атмосферных аэрозольных неоднородностей как в видимом, так и УФ спектральных диапазонах.

Кроме того, с точки зрения безопасности (прежде всего для глаз), УФ-диапазон представляет особый интерес. Лазерное излучение с длиной волны менее 0,38 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем лазерное излучение с длиной волны 0,38...1,4 мкм [7].

Настоящая статья посвящена разработке лазерного измерителя характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей в видимом (на длине волны 532 нм) и в УФ (на длине волны 355 нм) спектральных диапазонах. Решение такой задачи представляет практический интерес для оперативного мониторинга атмосферы (см., например, [8]).

Поскольку лазерный измеритель потенциально может быть использован как в стационарной, так и в бортовой аппаратуре, для него предпочтительно выбрать твердотельный лазер с наилучшими энергетическими характеристиками при высокой частоте повторения импульсов, например ИАГ:Nd³⁺-лазер на иттрий-алюминиевом гранате. Такой лазер имеет вторую гармонику в видимой области спектра (532 нм) и третью гармонику в УФ-области спектра (355 нм).

Далее приведены описание разработанного лазерного измерителя характеристик атмосферных неоднородностей, использующего вторую и третью гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате, примеры полученных экспериментальных данных, гистограммы и средние значения характеристик аэрозольных неоднородностей атмосферы.

Макет лазерного измерителя. На рис. 1 приведена структурная схема лазерного измерителя, работающего на длинах волн 532 и 355 нм.

В качестве источника излучения в измерителе используется импульсный твердотельный ИАГ:Nd³⁺-лазер с полупроводниковой накачкой и модуляцией добротности NL204 фирмы EKSPLA. Данный лазер имеет сменные модули генерации гармоник, что позволяет получить разную длину волны лазерного излучения: 1064; 532; 355; 266 нм.

Конструктивно лазер NL204 выполнен в виде блока питания, включающего в себя полупроводниковый лазер накачки, и излучателя

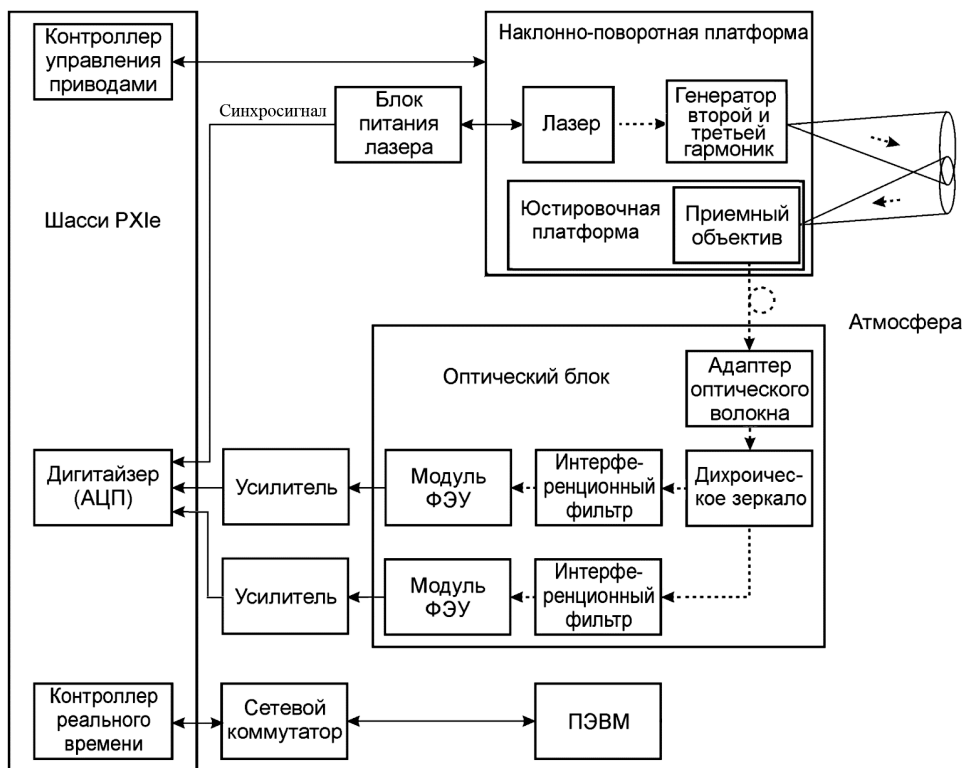


Рис. 1. Структурная схема лазерного измерителя, работающего на длинах волн 532 и 355 нм

лазера, состоящего из лазерной головки, генерирующей излучение на длине волны 1,064 мкм, и модулей генератора гармоник [9].

Основные характеристики лазера EKSPAN-L204 с модулями второй и третьей гармоник

	Третья гармоника	Вторая гармоника
Длина волны, нм	355	532
Энергия импульса, мДж	1,3	2
Длительность импульса (полная ширина на полувысоте), нс	7	7
Частота повторения импульсов, Гц	10–500	10–500
Диаметр пучка, мм	0,8	0,8
Расходимость излучения (полный угол по уровню $1/e^2$), мрад, не более	3	3

В качестве приемного объектива в лазерном измерителе использовался зеркальный объектив КЗО фирмы “Наноспектрум инструментс”. Данный объектив реализован по схеме Кассегрена и имеет разъем SMA-905 для присоединения оптоволокну.

Основные характеристики зеркального объектива КЗО

Фокусное расстояние, мм	350
Относительное отверстие	1:2,6
Поле зрения 2ω при использовании оптоволокну диаметром 1500 мкм, мрад	4,3

Применение зеркальных оптических элементов позволяет использовать данный объектив в широком спектральном диапазоне от УФ (200 нм) до ближнего ИК (2000 нм).

Для обеспечения возможности совмещения оптических осей приемного объектива и лазерного излучателя объектив установлен на юстировочной платформе, позволяющей менять наклон и поворот объектива относительно лазера.

Излучение от приемного объектива транспортируется по оптическому волокну в оптический блок, который служит для спектральной селекции полезного сигнала и преобразования оптического излучения в электрический сигнал. Адаптер оптического волокна формирует параллельный пучок, необходимый для эффективной работы интерференционного фильтра (интерференционные фильтры используются для выделения полезного сигнала).

В качестве приемника излучения использован фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) Hamamatsu H10721-20 — для регистрирования излучения на длине волны 532 нм и ФЭУ Hamamatsu H7826-013 — для регистрирования излучения на длине волны 355 нм [10, 11].

Данные ФЭУ имеют в своем составе высоковольтный источник питания для динодов, что существенно упрощает работу с фотоприемником и повышает его надежность. Оба ФЭУ имеют возможность электронной регулировки коэффициента усиления в широких пределах.

Чтобы получить сигнал, уровень которого достаточен для работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), к выходу ФЭУ подключали широкополосный усилитель Hamamatsu C5594.

Система регистрации сигналов и управления макетом лазерного измерителя была реализована с использованием архитектуры PXI (PCI Extensions for Instrumentation — расширение шины PCI для контрольно-измерительной аппаратуры) [12]. Модульная платформа-PXI предназначена для построения многофункциональных контрольно-измерительных систем, испытательного оборудования, систем автоматизации и т.д.

Для управления приводами наклонно поворотной платформы использовался модуль NIPXI 7332.

Для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму в макете лазерного измерителя использовались модули высокоскоростных АЦП — дигитайзеров (АЦП NI PXI-5124).

Общее управление, тематическая обработка сигналов, отображение и сохранение результатов осуществлялось на ПЭВМ, работающей под управлением ОС Windows. Графический интерфейс пользователя также реализован в программном обеспечении, установленном на ПЭВМ.

Взаимосвязь между ПЭВМ и контроллером реального времени NIPXIe-8102 RT осуществлялась по интерфейсу Gigabit Ethernet. Сетевой коммутатор позволяет подключать несколько узлов сети Ethernet.

Программное обеспечение макета лазерного измерителя разработано в среде NI LabVIEW, позволяющей быстро и высокоэффективно создавать гибкие, легко изменяемые приложения [13, 14].

Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений представлена на рис. 2.

Для хранения результатов измерений использовался формат Technical Data Management Streaming (TDMS) [15], позволяющий сохранять данные с высокой скоростью и хранить в одном файле результаты измерений и данные, описывающие условия проведения эксперимента.

На этапе загрузки из файла TDMS считываются реализации сигнала обратного рассеяния и условия проведения эксперимента.

На этапе децимации из загруженных реализаций обратного рассеяния формируется двухмерное поле принятого сигнала. Затем путем децимации с усреднением из этого поля устраняется избыточность.

На следующем этапе рассчитывается среднее значение реализации сигнала обратного рассеяния. Для этого каждая строка двухмерного поля принятого сигнала (соответствующая определенной временной задержке — дальности) усредняется.

На этапе локального выравнивания устраняется влияние колебания энергии импульса лазерного излучения.

Затем из каждой реализации принятого сигнала вычитается среднее значение реализации сигнала обратного рассеяния.

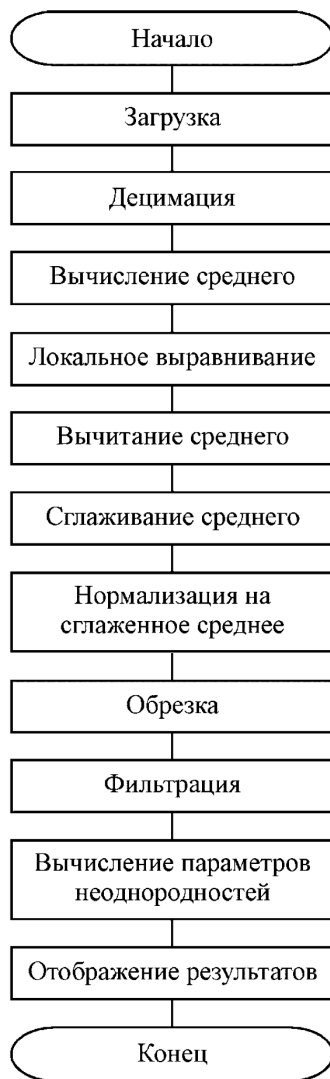


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки результатов измерений

На этапе сглаживания средняя реализация сигнала обратного рассеяния аппроксимируется сглаживающим кубическим сплайном.

На следующем этапе каждая реализация принятого сигнала нормируется на значение сглаженного среднего.

Данные операции позволяют выделить из зарегистрированного обратно рассеянного сигнала относительные флуктуации объемного коэффициента обратного рассеяния:

$$\frac{\tilde{\beta}_i(r)}{\bar{\beta}(r)} \approx \frac{P_i(r) - \bar{P}(r)}{\bar{P}(r)},$$

где $P_i(r)$ — реализация сигнала обратного рассеяния для i -го зондирующего импульса; $\bar{P}(r)$ — среднее по серии зондирующих импульсов значение сигнала обратного рассеяния; $\bar{\beta}(r)$, $\tilde{\beta}_i(r)$ — пространственное распределение среднего значения и флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеивания для i -го зондирующего импульса.

Полученное двухмерное поле принятого сигнала обрезается по дальности, при этом отсекаются начальный участок, в котором сигнал отсутствует из-за раннего старта АЦП, и конечный участок, в котором сигнал недостаточен из-за большой дальности.

Полученное двумерное поле сигнала фильтруется. На следующем этапе вычисляются параметры неоднородностей атмосферы. Полученные результаты отображаются и при необходимости сохраняются.

Натурные измерения. С помощью созданного макета проводились экспериментальные исследования характеристик аэрозольных неоднородностей атмосферы на длинах волн 532 и 355 нм. Измерения проводились в весенне-летний период в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На рис. 3 приведен типичный эхо-сигнал, обратно рассеянный атмосферой при лазерном зондировании одиночным импульсом. На рис. 4 приведены типичные примеры одновременного измерения пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы (коэффициент вариации определяется как отношение СКО объемного коэффициента обратного рассеяния к среднему значению объемного коэффициента обратного рассеяния) на длинах волн 532 и 355 нм для двух разных летних дней (10.06.2015 и 24.06.2015).

На рисунках по оси абсцисс отложено расстояние до лидара, а по оси ординат — время регистрации его сигнала. Аэрозольные неоднородности атмосферы показаны в виде изолиний.

На рис. 4 результаты измерений сглажены для устранения влияния высокочастотных флуктуаций. Окно сглаживания по времени равнялось 0,5 с, а по дальности — 1,5 м. Данные измерения проводились при облачной погоде и метеорологической дальности видимости более 15 км.

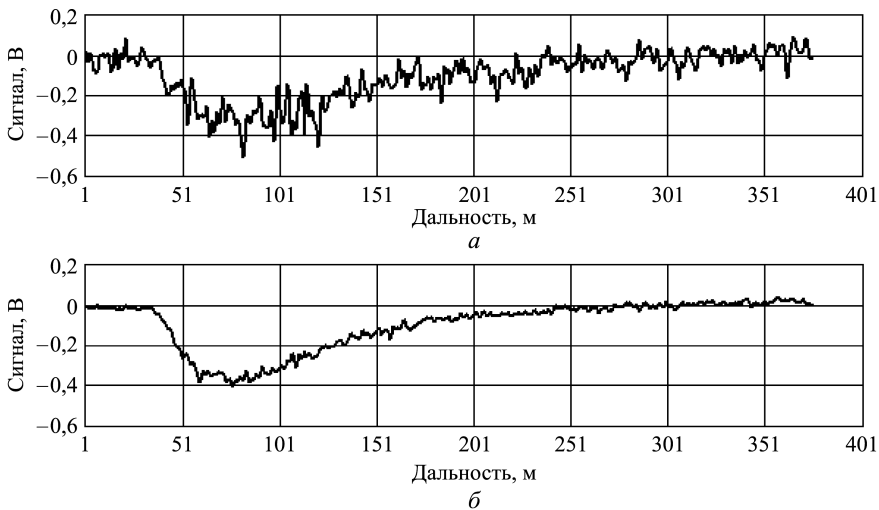


Рис. 3. Эхо-сигнал, обратно рассеянный атмосферой:

a — длина волны 532 нм; *б* — длина волны 355 нм

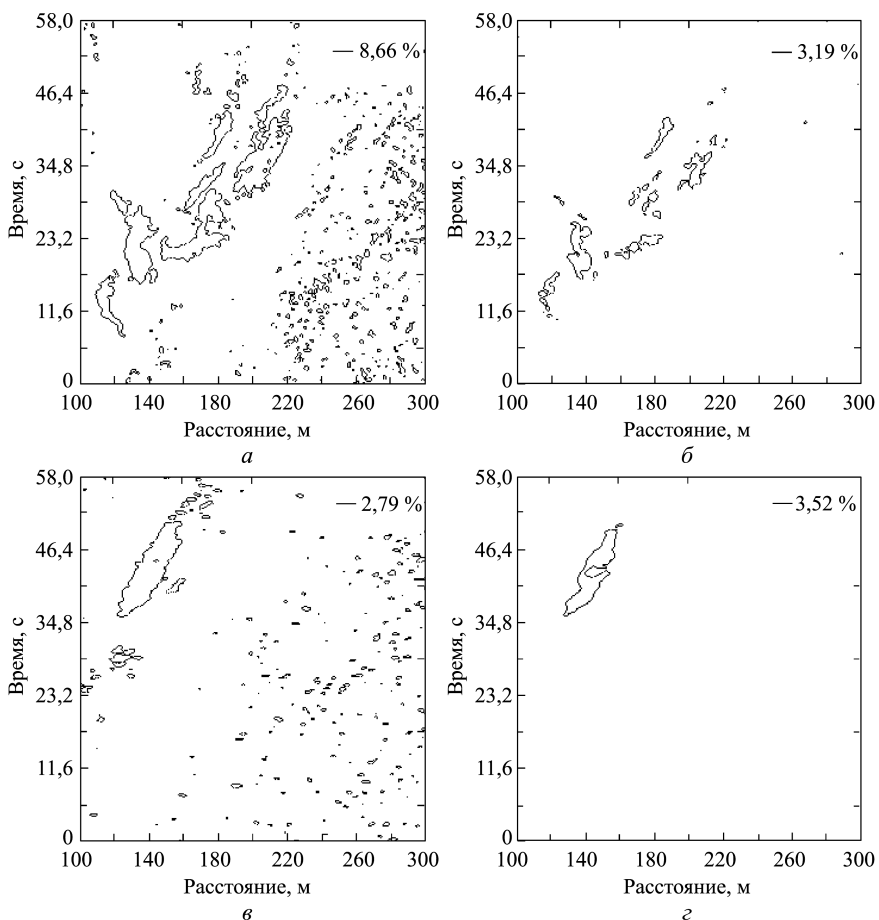


Рис. 4. Пространственно-временное распределение коэффициента вариации:
a, б — измерения выполнены 10.06.2015; *в, г* — измерения выполнены 24.06.2015;
длина волны зондирования 532 нм (*a, в*) и 355 нм (*б, г*)

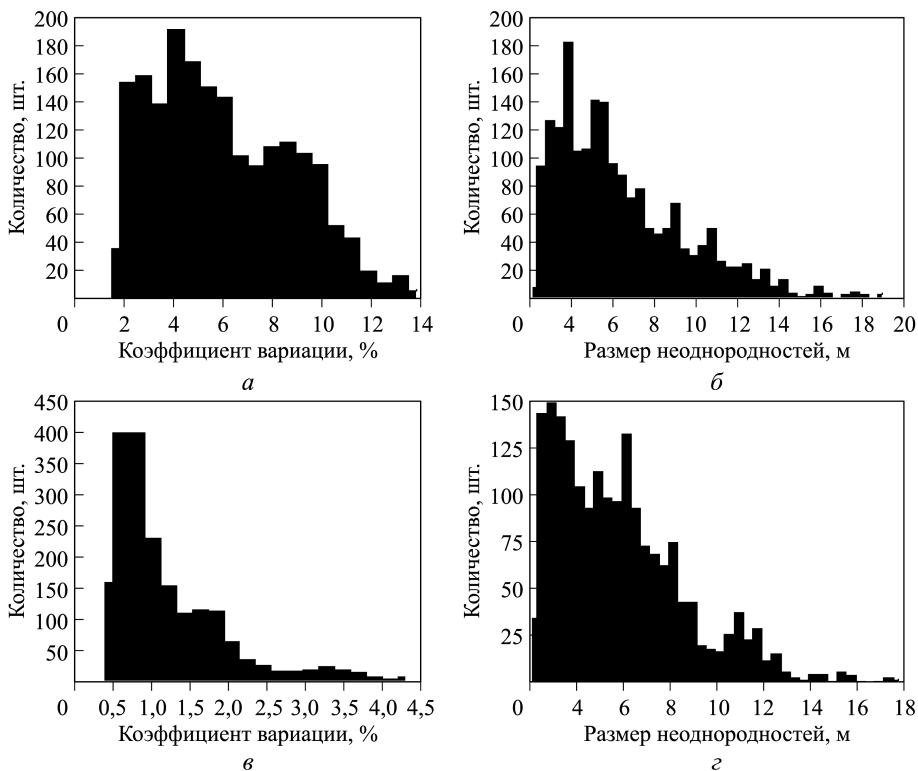


Рис. 5. Гистограммы коэффициентов вариации (*а, в*) и размеров неоднородностей (*б, г*) для волн зондирования длиной 532 нм (*а, б*) и 355 нм (*в, г*); измерения проводились 10.06.2015

Результаты обработки массивов пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента приведены на рис. 5 (измерения выполнены 10.06.2015). Там же показаны гистограммы коэффициента вариации и размеров неоднородностей (размер неоднородностей объемного коэффициента обратного рассеяния определяются по спаданию в e раз корреляционной функции реализации флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния). Гистограммы получены для сигнала с расстояния 100...200 м и при большом отношении сигнал/шум.

Средние значения коэффициента вариации составили 6 и 1,2% (рис. 5, *а, в*), средние размеры неоднородностей — 6,4 м и 5,9 м (рис. 5, *б, г*).

На рис. 6 приведены результаты аналогичных измерений, выполненных 24.06.2015.

Среднее значение коэффициента вариации на рис. 6, *а, в* составило порядка 3 и 2,1%, средний размер неоднородностей — 3,8 м и 5,5 м (рис. 6, *б, г*).

Как следует из рис. 5 и 6, в атмосфере присутствуют неоднородности разных масштабов: от единиц метров (пространственное раз-

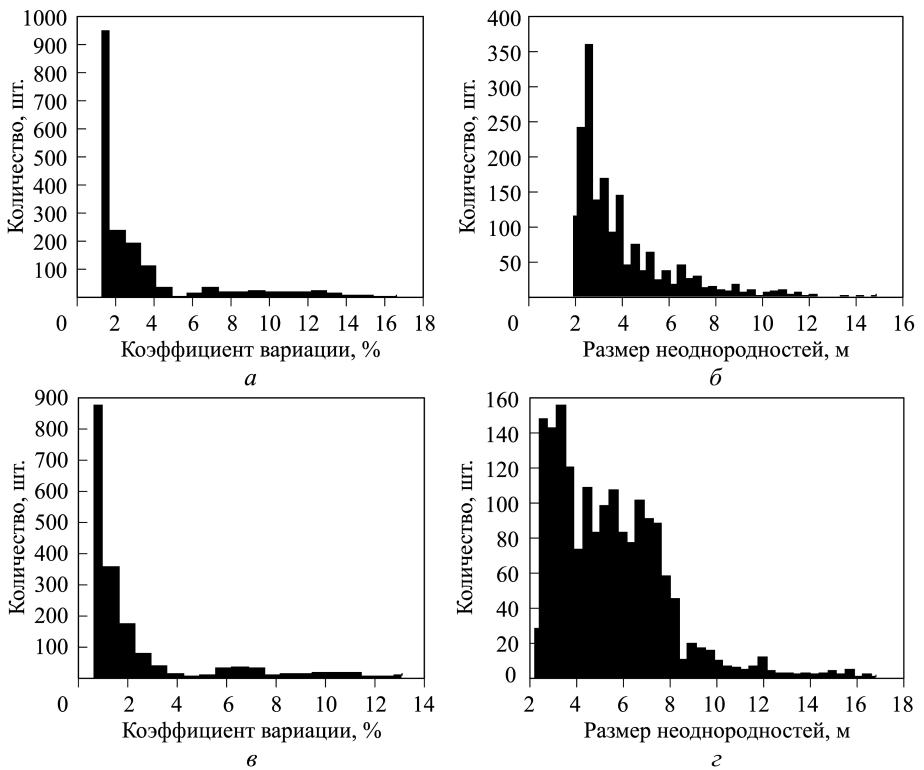


Рис. 6. Гистограммы коэффициентов вариации (*а, в*) и размеров неоднородностей (*б, г*) для волн зондирования длиной 532 нм (*а, б*) и 355 нм (*в, г*); измерения выполнены 24.06.2015

решение лидара 1,5 м не позволяет зарегистрировать неоднородности меньших размеров) до 10 м и более. При этом не наблюдается регулярной зависимости средних размеров регистрируемых неоднородностей атмосферы от длины волны зондирования.

Среднее значение коэффициента вариации сильно зависит от используемой длины волны зондирования. При определенных метеоусловиях коэффициент вариации для длины волны 532 нм значительно больше (например, в 5 раз по данным измерений 10.06.2015), чем для волны зондирования длиной 355 нм. При других метеоусловиях коэффициент вариации для волны 532 нм немного больше (например, в 1,4 раза по данным измерений 24.06.2015), чем для волны зондирования 355 нм.

Таким образом, коэффициент вариации для длины волны 532 нм имеет существенно большее значение, чем коэффициент вариации для волны длиной 355 нм. Полученная закономерность отмечалась в [16] для самолетных измерений на высотах более 500 м для волн видимого (550 ± 20 нм) и УФ- (370 ± 20 нм) диапазонов спектра, где в качестве источника излучения использовалась импульсная ксеноновая лампа и набор спектральных фильтров.

Выводы. Разработан лазерный измеритель характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей, работающий в видимом и УФ спектральном диапазонах на волнах излучения длиной 532 и 355 нм (безопасной для глаз).

Приведен алгоритм обработки результатов измерений. Выявлено, что размер регистрируемых аэрозольных неоднородностей в среднем составляет ~ 5 м и практически не зависит от длины волны зондирования. Среднее же значение коэффициента вариации сильно зависит от длины волны зондирования — для 532 нм коэффициент вариации больше, чем для 355 нм, различие находится в диапазоне от $\sim 1,4$ до ~ 5 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аэрозольный лидар CATS* [Электронный ресурс]. URL: http://www.laserportal.ru/content_956 (дата обращения 20.06.2015).
2. *Лазерное зондирование атмосферы* [Электронный ресурс]. URL: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> (дата обращения 20.06.2015).
3. *Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В.* Трехчастотный лидар для зондирования микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 125–130.
4. *Алексеев В.А., Ляш А.Н., Першин С.М.* Лидарный мониторинг тектонической активности в Тамани по выбросам аэрозолей. Отработка метода. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf> (дата обращения 20.06.2015).
5. *Волков Н.Н.* Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы. Отработка метода // Науч.-техн. вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та информ. технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 7–9.
6. *Лазерные лидарные комплексы* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (дата обращения 20.06.2015).
7. *Лазерная безопасность.* Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581–2012. М.: Стандартинформ, 2013.
8. *Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А.* Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 5. С. 381–384.
9. *NL200 series laser datasheet* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/nl200-series-nanosecond-q-switched-diode-pumped-laser.pdf> (дата обращения 20.06.2015).
10. *Hamamatsu.* Photosensor module H7826-01 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H7826-01/index.html> (дата обращения 20.06.2015).
11. *Hamamatsu.* Photosensor module H10720-20 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html> (дата обращения 20.06.2015).
12. *Головастов А.* Стандарт РХИ-технология и оборудование для построения контрольно-измерительных систем // Компоненты и технологии. 2012. № 3. С. 132–138.
13. *Тревис Д.* LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс; Прибор Комплект, 2005. 544 с.

14. *LabVIEW System Design Software* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ni.com/labview/> (дата обращения 20.06.2015).
15. *The NI TDMS File Format* [Online]. URL: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/> (дата обращения 20.06.2015).
16. *Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра* / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.

REFERENCES

- [1] Aerosol'nyy lidar CATS. Available at: http://www.laserportal.ru/content_956 (accessed 20.06.2015).
- [2] Lazernoe zondirovanie atmosfery. Available at: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> (accessed 20.06.2015).
- [3] Burlakov V.D., Dolgiy S.I., Nevzorov A.V. A Three-Frequency Lidar for Sensing Microstructure Characteristics of Stratospheric Aerosols *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 6, pp. 890–894. DOI: 10.1134/S0020441210060230
- [4] Alekseev V.A., Lyash A.N., Pershin S.M. Lidar Monitoring Tectonic Activity in Taman by Aerosol Emission. Method Refining. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf> (accessed 20.06.2015).
- [5] Volkov N.N. Choice of Multiwave Aerosol Lidar Parameters for Remote Atmosphere Sounding. *Nauch.-tekh. vestnik Sankt-Peterburgskogo univ. inform. tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2012, no. 1 (77), pp. 7–9 (in Russ.).
- [6] Lazernye lidarnye komplekсы. Available at: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (accessed 20.06.2015).
- [7] Standard RF GOST 31581–2012. Lazernaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya bezopasnosti pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdeliy [State Standard 31581–2012. General Safety Requirements for the Design and Operation of Laser Products]. Moscow, Standartinform Publ., 2013.
- [8] Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser method of approximate measurement of instantaneous wind velocity and direction. *Opt. Atmos. Okeana* [Atmos. Ocean Opt.], 2013, vol. 26, no. 5, pp. 381–384 (in Russ.).
- [9] NL200 series laser datasheet. Available at: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/nl200-series-nanosecond-q-switched-diode-pumped-laser.pdf> (accessed 20.06.2015).
- [10] Hamamatsu. Photosensor module H7826-01. Available at: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H7826-01/index.html> (accessed 20.06.2015).
- [11] Hamamatsu. Photosensor module H10720-20. Available at: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html> (accessed 20.06.2015).
- [12] Golovastov A. The PXI standard — technology and equipment for the construction of control and measurement systems. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2012, no. 3, pp. 132–138 (in Russ.).
- [13] Travis J., Kring J. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. Prentice Hall, 2006.
- [14] LabVIEW System Design Software. Available at: <http://www.ni.com/labview/> (accessed 20.06.2015).
- [15] The NI TDMS File Format [Online]. Available at: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/> (accessed 20.06.2015).

[16] Matvienko G.G., Zade G.O., Ferdinandov E.S., Kolev I.N., Avramova R.P. Korrelyatsionnye metody lazerno-lokatsionnykh izmereniy skorosti vetra [Correlation Methods of Laser Radar Wind Speed Measurements]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 223 p.

Статья поступила в редакцию 14.08.2015

Иванов Сергей Евгеньевич — канд. техн. наук, начальник сектора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Ivanov S.E. — Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Федотов Юрий Викторович — канд. техн. наук, начальник сектора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Fedotov Yu.V. — Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Филимонов Павел Анатольевич — аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Filimonov P.A. — post-graduate student of Laser and Optic-Electronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Белов Михаил Леонидович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Belov M.L. — Dr. Sci. (Eng.), Leading Research Scientist of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Городничев Виктор Александрович — д-р. техн. наук, заведующий кафедрой “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э.Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Gorodnichev V.A. — Dr. Sci. (Eng.), Head of Instrument Devices Elements Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Иванов С.Е., Федотов Ю.В., Филимонов П.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Лазерный измеритель характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 67–78. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-67-78

Please cite this article in English as:

Ivanov S.E., Fedotov Yu.V., Filimonov P.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser meter of atmospheric aerosol inhomogeneity properties in visible and ultraviolet spectral bands. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 2, pp. 67–78. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-2-67-78