

## Аэрозольный зонд обратного рассеяния для ракетных и баллонных исследований

© Н.В. Балугин, В.А. Юшков

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория»,  
г. Долгопрудный Московской обл., 141707, Россия

*Приведено краткое описание оптического зонда для прямых измерений и исследований вертикального распределения аэрозольной компоненты атмосферы. Принцип его действия основан на измерении обратного рассеяния от последовательности мощных зондирующих импульсов. Анализируемый объем воздуха расположен на близком расстоянии (0,5 м) от источника излучения. В качестве источников излучения используются светодиоды на 470 нм и 940 нм. Зонды легко интегрируются со стандартными аэрологическими радиозондами всех типов, с метеорологическими ракетами, а также могут быть использованы в автономных пусках, так как оборудованы собственным навигационным модулем и телеметрической системой. Приведены результаты измерений, проведенных на аэрологической станции «Долгопрудный» в ноябре 2020 г., при этом были зафиксированы низкие значения коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере.*

**Ключевые слова:** аэрозоль, обратное рассеяние, тропосферный аэрозоль, стратосферный аэрозоль, баллонное зондирование, оптические параметры

**Введение.** Цель работы — создание полетного прибора аэрологического и ракетного зондирования для изучения и мониторинга вертикального распределения атмосферного аэрозоля. Аэрозольные частицы атмосферы участвуют в формировании ее температурного режима, процессов облакообразования, химического разрушения озона и в других процессах, ответственных за формирование и изменение погоды и климата.

Для исследования атмосферных процессов с участием аэрозольных частиц разработан новый экономически эффективный, технологичный, легкий (массой менее 1 кг) прибор — аэрозольный зонд обратного рассеяния (далее АЗОР) для баллонного (до 30 км) и ракетного (до 70 км) зондирования атмосферы. Концепция оптического зонда обратного рассеяния впервые была представлена в [1].

**Описание прибора.** Принцип действия АЗОР, подобный примененному в лазерном лидаре, заключается в формировании мощным источником света последовательности зондирующих импульсов, направленных в свободную атмосферу, и одновременном синхронном накоплении эхо-сигналов. В качестве источников излучения используются светодиоды на 470 нм и 940 нм. Светорассеивающий объем, расположенный на близком расстоянии (~0,5 м) от источника излучения, формируется линзовой системой фотоприемников и

не превышает  $0,1 \text{ м}^3$  (рис. 1, для простоты понимания указан лишь один излучатель). Этот объем остается неизменным в процессе полета и измерений, а на таких малых линейных расстояниях оптические сигналы для выбранных длин волн практически не ослабляются. Для уменьшения сторонних засветок от лунного света (испытания проводились в условиях как полнолуния, так и безлунной ночи) и света городского освещения применена оптическая система, обеспечивающая угол обзора приемника не более  $15^\circ$ . Также для увеличения отношения сигнала к шуму (ОСШ) оптические оси фотоприемника и излучателя расположены под углом  $5^\circ$ .

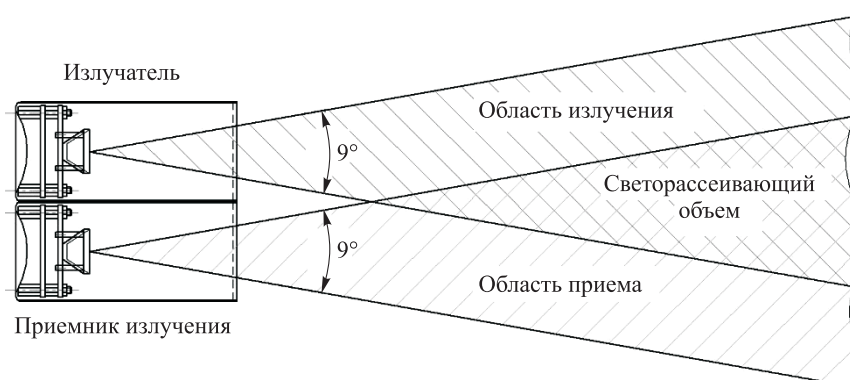


Рис. 1. Оптическая схема АЗОР

Структурная схема прибора представлена на рис. 2. Как было указано выше, АЗОР состоит из приемника оптического излучения на кремниевом фотодиоде и двух источников оптического излучения на длинах волн 470 нм и 940 нм. Приемник и излучатели расположены таким образом, что обеспечивается измерение обратно рассеиваемого излучения под углами  $175...180^\circ$ . Масса зонда в полной комплектации не более 1 кг, отношение сигнала к шуму не менее 100 (на высоте 30 км). Период измерения аэрологического зонда составляет 2 с, что при скорости его подъема 5 м/с обеспечивает вертикальное разрешение 10 м. Для ракетного варианта прибора на парашютном спуске со скоростью 100 м/с вертикальное разрешение не превысит 200 м для верхней стратосферы. Наряду с перечисленным выше зонд комплектуется собственным измерителем температуры атмосферы (точность измерения  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), навигационным модулем ГЛОНАСС/GPS, а также собственным радиопередатчиком, работающим в диапазоне частот 433 МГц).

Для того чтобы обеспечить необходимое ОСШ, в приборе реализовано синхронное детектирование с накоплением. Приемник и источники оптического излучения термостатированы при температуре  $25 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . В процессе измерений (полета) осуществляется контроль интенсивности излучения источников.

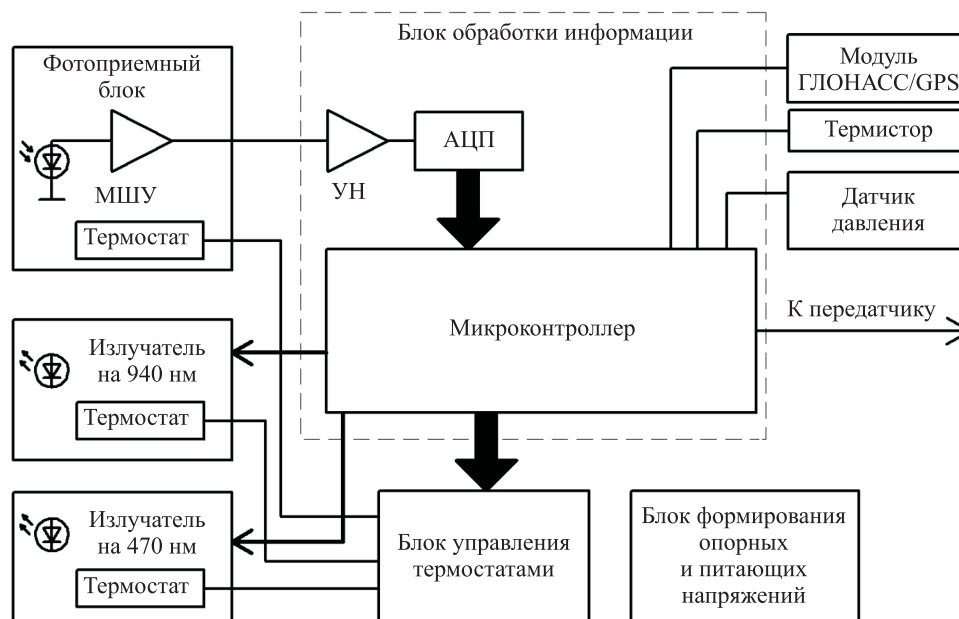


Рис. 2. Структурная схема аэрозольного зонда обратного рассеяния

**Описание метода.** Значения температуры и давления анализируемого воздуха в рассеивающем объеме получают путем прямых измерений радиозондом, к которому механически присоединяется АЗОР, укомплектованный самостоятельным навигационным модулем для определения координат зонда в полете и автономной телеметрической системой для передачи данных измерений. Предусмотрена опция подключения к АЗОР датчика температуры и датчика давления. Благодаря этой расширенной опции АЗОР можно проводить его пуски автономно от радиозондирования в любом регионе до высоты подъема оболочки  $\sim 30$  км. Критическими условиями для всепогодного применения АЗОР являются только темное время суток и ограничения по массе.

Интенсивность эхо-сигнала на определенной высоте измерения напрямую связана с интенсивностью светового зондирующего излучателя и объемными коэффициентами обратного молекулярного и обратного аэрозольного рассеяния на этой высоте. Интенсивность молекулярного когерентного рассеяния света на частицах или неоднородностях, когда частота рассеиваемого света существенно меньше собственной частоты рассеивающего объекта, линейно связана с концентрацией этих частиц или неоднородностей.

Количественной характеристикой пространственного распределения аэрозоля в этом методе является вертикальный профиль отношения значения аэрозольного рассеяния к молекулярному рассеянию для разных длин волн зондирующего импульса. В методику измерений зало-

жена априорная информация, что на максимальных высотах подъема фотоприемник прибора измеряет сигнал только молекулярного рассеяния, так что влиянием аэрозольного рассеяния можно пренебречь.

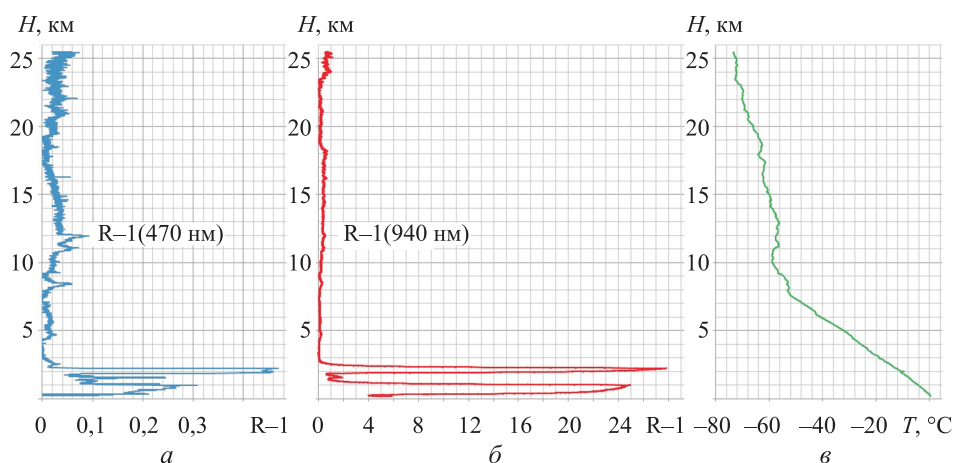
Следует отметить, что фотоприемник улавливает фоновое излучение ночного неба, которое может быть существенно больше сигнала обратного рассеяния. Однако применение синхронного детектирования сигнала позволяет устранить это влияние.

Таким образом, получается следующий алгоритм обработки полученных в результате полета АЗОР данных:

- 1) восстанавливается профиль давления и плотности атмосферы с помощью полученного профиля температуры;
- 2) рассчитывается профиль объемного молекулярного коэффициента обратного рассеяния для каждой используемой длины волны;
- 3) минимальное значение измеренного сигнала ставится в соответствие коэффициенту обратного молекулярного рассеяния;
- 4) берется отношение полученного профиля ( $\beta_a(h, \lambda)$ ) к профилю коэффициента обратного молекулярного рассеяния ( $\beta_R(h, \lambda)$ ) и получается вертикальный профиль отношения обратного рассеяния для данной длины волны:

$$R(h, \lambda) = 1 + \beta_a(h, \lambda) / \beta_R(h, \lambda). \quad (1)$$

**Результаты испытаний.** Полетные результаты выпуска АЗОР на аэрологической станции «Долгопрудная» 24.11.2020 г. представлены на рис. 3. В этом пуске нормировка сигнала проводилась по его минимальному значению на высоте  $z = 17,2$  км, где по принятому предположению обратное рассеяние осуществляется только молекулами воздуха в отсутствие аэрозоля. Для стратосферных высот (выше



**Рис. 3.** Результаты запуска АЗОР 24.11.2020 г. для вертикального распределения отношения коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния для длин волн 470 нм (а) и 940 нм (б) и профиль температур (в)

тропопаузы) на дату зондирования отмечается отсутствие аэрозольных слоев, вызванных вулканическим воздействием или пироконвекцией. Для тропосферы характерно увеличение сигнала в облачных системах и в области инверсий температуры. Границы нижней и верхней облачности ее слоистости легко определяются по этим данным прямых измерений.

**Заклучение.** Разработан аэрозольный зонд обратного рассеяния для ракетного и баллонного зондирования, обладающий необходимой чувствительностью и динамическим диапазоном для прямых измерений вертикального распределения аэрозоля. Его можно рекомендовать для научных исследований и геофизического мониторинга атмосферы, изучения и мониторинга полярных стратосферных облаков, тропосферного и стратосферного аэрозоля, пироконвекции, вулканического аэрозоля. Прямые измерения с помощью аэрозольного зонда можно использовать для валидации данных дистанционных измерений наземного и космического базирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rosen J.M., Kjome N.T. Backscattersonde: a new instrument for atmospheric aerosol research. *Applied Optics*, 20 April 1991, vol. 30, no. 12, pp. 1552–1556.
- [2] Хргиан А.Х. *Физика атмосферы*. Ленинград, Гидрометеиздат, 1969.
- [3] Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. *Опτικο-электронные методы изучения аэрозолей*. Москва, Энергоиздат, 1981.
- [4] Петрянов-Соколов И.С., Сутугин А.Г. *Аэрозоли*. Москва, Наука, 1989.
- [5] Зуев В.Е., Кабанов М.В. *Оптика атмосферного аэрозоля*. Ленинград, Гидрометеиздат, 1987.
- [6] Knestrick G.L., Cosden T.H., Curcio J.A. Atmospheric scattering coefficients in the visible and infrared regions. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, no. 9, pp. 1010–1016.
- [7] Yue G.K., Deepak A. Retrieval of stratospheric aerosol size distribution from atmospheric extinction of solar radiation at two wavelengths. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 11, pp. 1639–1645.
- [8] Mergenthaler J. Inversion of polarization measurements at BUV wavelengths to recover ozone and aerosol profiles. *Applied Optics*, 1984, vol. 23, no. 7, pp. 990–997.
- [9] Thomason L.W. A diagnostic stratospheric aerosol size distribution inferred from SAGE II measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, no. D12, pp. 22501–22508.
- [10] Rosen J.M., Kjome N.T. Backscattersonde: a new instrument for atmospheric aerosol research. *Applied Optics*, 1991, vol. 30, no. 12, pp. 1552–1561.
- [11] Pinnick R.G., Hofmann D.J. Efficiency of light-scattering aerosol particle counters. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 11, pp. 2593–2597.
- [12] Pinnick R.G., Rosen J.M., Hofmann D.J. Measured light-scattering properties of individual aerosol particles compared to mie scattering theory. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 1, pp. 37–41.
- [13] Rosen J.M., Pinnick R.G., Garvey D.M. Nephelometer optical response model for the interpretation of atmospheric aerosol measurements. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 12, pp. 2642–2649.

Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Балугин Н.В., Юшков В.А. Аэрозольный зонд обратного рассеяния для ракетных и баллонных исследований. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-11-2132>

**Балугин Николай Владимирович** — ведущий инженер ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория». e-mail: [balugin-nv@yandex.ru](mailto:balugin-nv@yandex.ru)

**Юшков Владимир Александрович** — канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория». e-mail: [v\\_yushkov@mail.ru](mailto:v_yushkov@mail.ru)

## **Aerosol backscatter probe for rocket and balloon research**

© N.V. Balugin, V.A. Yushkov

Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow region, 141707, Russia

*The article briefly describes an optical probe for direct measurements and studies of the vertical distribution of the aerosol component of the atmosphere. The operation principle is based on the measurement of backscattering from a sequence of powerful probing pulses. The analyzed air volume is located at a close (0.5 m) distance from the radiation source. LEDs at 470 nm and 940 nm are used as radiation sources. The probe can be easily integrated with all types of standard aerological radiosondes, meteorological rockets, and having its own navigation module and telemetry system it can also be used in autonomous launches. The results of measurements carried out at the Dolgoprudny aerological station in November 2020, which recorded low values of the aerosol backscattering coefficients in the stratosphere, are presented.*

**Keywords:** aerosol, backscattering, tropospheric aerosol, stratospheric aerosol, balloon sounding, optical parameters

### REFERENCES

- [1] Rosen J.M., Kjome N.T. *Applied Optics*, 20 April 1991, vol. 30, no. 12, pp. 1552–1556.
- [2] Khrgian A.Kh. *Fizika atmosfery* [Physics of the atmosphere]. Leningrad, Hydro-meteoizdat Publ., 1969, 458 p.
- [3] Belyaev S.P., Nikiforova N.K., Smirnov V.V., Shchelchikov G.I. *Optiko-elektronnyye metody izucheniya aerorozoley* [Optoelectronic methods for studying aerosols]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 232 p.
- [4] Petryanov-Sokolov I.S., Sutugin A.G. *Aerorozoli* [Aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 142 p.
- [5] Zuev V.E, Kabanov M.V. *Optika atmosfernogo aerorozolya* [Atmospheric aerosol optics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987, 255 p.
- [6] Knestrick G.L., Cosden T.H., Curcio J.A. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, no. 9, pp.1010–1016.
- [7] Yue G.K., Deepak A. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 11, pp. 1639–1645.
- [8] Mergenthaler J. *Applied Optics*, 1984, vol. 23, no. 7, pp. 990–997.
- [9] Thomason L.W. *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, no. D12, pp. 22501–22508.
- [10] Rosen J.M., Kjome N.T. *Applied Optics*, 1991, vol. 30, no. 12, pp. 1552–1561.
- [11] Pinnick R.G., Hofmann D.J. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 11, pp. 2593–2597.
- [12] Pinnick R.G., Rosen J.M., Hofmann D.J. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 1, pp. 37–41.
- [13] Rosen J.M., Pinnick R.G., Garvey D.M. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 12, pp. 2642–2649.

**Balugin N.V.**, Leading Engineer, Central Aerological Observatory.  
e-mail: balugin-nv@yandex.ru

**Yushkov V.A.**, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of the Department of Central Aerological Observatory. e-mail: v\_yushkov@mail.ru