

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИДАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО НАПОЛНЕНИЯ В МЕЗОСФЕРЕ

<sup>1,2</sup>С.М. Бобровников, <sup>1</sup>В.И. Жарков, <sup>1</sup>А.И. Надеев, <sup>1</sup>Д.А. Трифонов

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
trifonov@iao.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

## APPLYING LIDAR TECHNOLOGY FOR OBSERVATION OF AEROSOL FILLING IN THE MESOSPHERE

<sup>1,2</sup>S.M. Bobrovnikov, <sup>1</sup>V.I. Zharkov, <sup>1</sup>A.I. Nadeev, <sup>1</sup>D.A. Trifonov

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
trifonov@iao.ru

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

**Аннотация.** Представлен лидар высокого спектрального разрешения на основе йодного молекулярного фильтра для измерений отношения рассеяния в диапазоне высот 10–90 км, а также корректных измерений вертикального распределения температуры стратосферы и мезосферы. Показано, что использование технологии высокого спектрального разрешения позволяет разделить молекулярную и аэрозольную составляющие в сигнале рэлеевского рассеяния.

**Ключевые слова:** лидар высокого спектрального разрешения, молекулярное рассеяние, аэрозольное рассеяние, мезосфера.

**Abstract.** This paper presents the High Spectral Resolution Lidar which is based on an iodine molecular filter and aimed at measuring the scattering ratio in the altitude range from 10 to 90 km and at correct measuring of the vertical temperature distribution of the stratosphere and mesosphere. Application of high spectral resolution technology is shown to make it possible to separate the molecular and aerosol components in the Rayleigh scattering signal.

**Keywords:** High Spectral Resolution Lidar (HSRL), molecular scattering, aerosol scattering, mesosphere.

### ВВЕДЕНИЕ

При измерении вертикального распределения температуры атмосферы используются лидары на основе рэлеевского рассеяния, поскольку измерение температуры связано с восстановлением профиля молекулярной плотности атмосферы [Hauchecorne, Chanin, 1980; Shibata et al., 1986] и последующим его пересчетом в температуру, оправданном в предположении гидростатического равновесия атмосферы. Исходной информацией для таких лидаров является интенсивность несмещенного рассеяния зондирующего излучения, при этом принципиально неразделимы вклады молекулярного и аэрозольного рассеяния. Последнее обуславливает основной недостаток метода — он оказывается работоспособным лишь для области атмосферы, свободной от присутствия аэрозоля. Обычно это интервал высот от 30 км и выше [Hauchecorne, Chanin, 1980; Shibata et al., 1986; Бобровников и др., 2019]. Однако в некоторых работах встречаются результаты, где аэрозольное наполнение присутствовало в диапазоне высот 60–90 км. В работе [Матвиенко и др., 2019] акцентировалось внимание на том, что зарегистрированные слои в диапазоне высот 80–90 км являются уникальным случаем серебристых (мезосферных) облаков. Работа [Коршунов, Зубачев, 2022] посвящена влиянию увеличения обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере при измерении вертикального распределения температуры атмосферы по сигналам рэлеевского рассеяния. Обе эти работы говорят о том, что аэрозольное наполнение атмосферы, превышающее фоновое значение, может быть в диапазоне высот как 0–30 км, так и 60–90 км. При восстановлении вертикального распределения температуры необходимо использовать либо модель атмо-

сферы, либо переходить на многоволновое зондирование, либо применять специальные средства регистрации лидарного сигнала, которые будут разделять аэрозольную и молекулярную составляющие в сигнале несмещенного рассеяния.

Для выделения чисто молекулярного рассеяния из сигнала несмещенного рассеяния используется методика, основанная на технологии высокого спектрального разрешения, которая заключается в разделении лидарных откликов молекулярного рассеяния и рассеяния Ми (аэрозольного) с помощью узкополосного молекулярного абсорбционного фильтра на парах йода. Техническая реализация метода возможна только с использованием импульсного одночастотного лазера с инжектором с сверхузким спектром излучения [Бобровников и др., 2019].

В работе [Бобровников и др., 2019] подробно описан лидарный комплекс Сибирской лидарной станции (СЛС) с возможностью применения узкополосного молекулярного абсорбционного фильтра на парах йода для подавления аэрозольной составляющей в несмещенном рассеянии, что позволяет корректно восстанавливать вертикальное распределение температуры атмосферы в диапазоне высот 30–90 км. Помимо температуры атмосферы, использование технологии высокого спектрального разрешения позволит определить аэрозольное наполнение мезосферы путем расчета отношения рассеяния. На рис. 1 показана схема лидара СЛС на базе главного зеркала с возможностью использования технологии высокого спектрального разрешения.

Как видно на рис. 1, на лидаре СЛС есть возможность регистрировать несмещенное рассеяние с использованием обтюлятора для перекрытия фотокатода

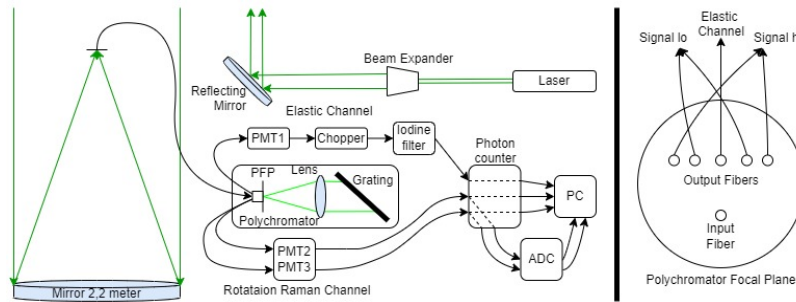


Рис. 1. Схема лидара высокого спектрального разрешения на базе главного зеркала СЛС ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН

ФЭУ в диапазоне высот 0–30 км и узкополосного молекулярного абсорбционного фильтра на парах йода для отделения молекулярной составляющей от аэрозольной. Следовательно, по сигналу несмещенного рассеяния в диапазоне высот 40–90 км. А в диапазоне высот 10–40 км для расчета отношения рассеяния можно использовать сигнал чисто вращательного спектра спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота и кислорода. В данной работе будет рассмотрен случай для диапазона высот 40–90 км.

Отношение рассеяния рассчитывается из лидарного сигнала по формуле (1) [Матвиенко и др., 2020; Набокин, 2018]:

$$R(H) = \frac{S(H)H^2}{CT^2(H)\beta_m(H)}, \quad (1)$$

где  $S(H)$  — лидарный сигнал;  $H$  — высота;  $T(H)$  — прозрачность слоя атмосферы от лидара до высоты  $H$  на длине волны лазера;  $\beta_m(H)$  — коэффициент обратного молекулярного рассеяния;  $C$  — аппаратная постоянная лидара, включающая площадь приемного телескопа, пропускание приемопередающего тракта, энергию лазерного импульса, квантовую эффективность фотодетектора. Значения  $\beta_m(H)$  рассчитывались из модели атмосферы NRLMSISE-90, при расчетах указывалось время и место измерения лидарного сигнала на СЛС. Однако использование модельных данных для расчета коэффициента обратного молекулярного рассеяния может привести к некорректным расчетам отношения рассеяния из-за возможного различия во времени и пространстве расчета модельных данных относительно измерений на СЛС. Для устранения этих недостатков необходимо проводить измерения коэффициента обратного молекулярного рассеяния одновременно по времени и географическому положению с регистрацией лидарных сигналов при помощи зондов или оценить достоверность пересчета к месту расположения СЛС используемых моделей атмосферы NRLMSISE-90.

На рис. 2 показано рассчитанное вертикальное распределение отношения рассеяния с использованием йодного фильтра и перестраиваемого Nd:YAG-лазера на длине волны 532.094 нм.

Видно, что рассчитанное отношение рассеяния близко к единице во всем диапазоне измерений, кроме участка 85–90 км. Таким образом, использование технологии высокого спектрального разрешения

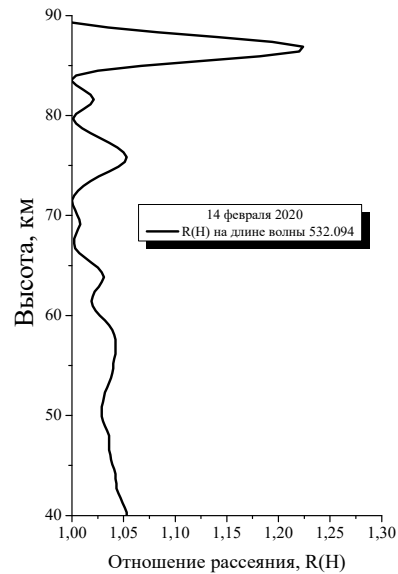


Рис. 2. Вертикальное распределение отношения рассеяния в диапазоне высот 40–90 км на лидарном комплексе СЛС 14.02.2020. Время измерения 30 мин

позволяет подавить аэрозольную составляющую в несмещенном рассеянии, что дает возможность корректно восстанавливать температуру атмосферы. На участке трассы зондирования 85–90 км отношение рассеяния, рассчитанное по лидарному сигналу, прошедшему через йодный фильтр, составляет 1.25, что является показателем присутствия частиц метеорной дымки — продукта абляции метеороидов размерами сотни микрон на высотах 75–120 км [Vardeen et al., 2008, Коршунов, Зубачев, 2022].

В работе [Бобровников и др., 2019] акцентировалось внимание на том, что использование узкополосного молекулярного абсорбционного фильтра на парах йода повысит точность измерения температуры атмосферы по сигналу несмещенного рассеяния. Однако для корректного восстановления плотности атмосферы с последующим пересчетом в температуру необходимо оценить, какая часть спектра молекулярного рассеяния будет подавлена йодным фильтром. Дальнейшая работа будет посвящена этому вопросу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения отношения рассеяния в диапазоне высот 10–90 км на базе главного зеркала СЛС можно использовать как технологию высокого спектрального

разрешения лидарного сигнала рэлеевского рассеяния (40–90 км), так и лидарные сигналы чисто вращательного спектра спонтанного комбинационного рассеяния на молекулах азота и кислорода (10–40 км).

Использование модельных данных может привести к ошибке измерений отношения рассеяния, следовательно, необходимо оценить точность модельных данных либо одновременно с лидарным измерениями проводить измерения коэффициента аэрозольного рассеяния другими методами.

Использование технологии высокого спектрально-го разрешения в диапазоне высот 40–90 км позволяет определить содержание аэрозоля в стратосфере и мезосфере, которое необходимо учитывать при восстановлении вертикального распределения температуры атмосферы по сигналам несмещенного рассеяния.

Для корректного восстановления плотности атмосферы с последующим пересчетом в температуру по сигналам несмещенного рассеяния необходимо оценить спектр молекулярного рассеяния на предмет того, какая часть спектра будет подавлена после прохождения лидарного сигнала через узкополосный молекулярный абсорбционный фильтр на парах йода.

Работы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2021-661).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Трифонов Д.А. Применение технологии высокого спектрального разрешения на Сибирской лидарной станции. *Труды XVI конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*. 2019. С. 323–325.

Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Увеличение обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере в 2019–2021 гг. и его влияние на измерения температуры рэлеевским методом. *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. № 01. С. 32–36. DOI: [10.15372/AOO20220105](https://doi.org/10.15372/AOO20220105).

Матвиенко Г.Г., Бабушкин П.А., Бобровников С.М. и др. Лазерное и оптическое зондирование атмосферы. *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 09. С. 726–740. DOI: [10.15372/AOO20190906](https://doi.org/10.15372/AOO20190906).

Матвиенко Г.Г., Маричев В.Н., Бобровников С.М. и др. Мезостратосферный лидар для гелио-геофизического комплекса. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 93–104. DOI: [10.12737/szf-62202007](https://doi.org/10.12737/szf-62202007).

Набокин А. А. Моделирование отражений лидарных сигналов в верхней атмосфере. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 2 (22). С. 28–32. DOI: [10.18454/2079-6641-2018-22-2-28-32](https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-22-2-28-32).

Bardeen C.G., Toon O.B., Jensen E.J., et al. Numerical simulations of the threedimensional distribution of meteoric dust in the mesosphere and upper stratosphere. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. D17202.

Hauchecorne A., Chanin M.-L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 75 km. *Geophys. Res. Lett.* 1980. Vol. 7. P. 565–568.

Shibata T., Kobuchi M., Maeda M. Measurement of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar. *Applied Optics*. 1986. Vol. 25, no. 5. P. 685–688.