

## ЛИДАРНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА СИБИРСКОЙ ЛИДАРНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ

<sup>1,2</sup>С.М. Бобровников, <sup>1,2</sup>Е.В. Горлов, <sup>1</sup>В.И. Жарков, <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

## LIDAR COMPLEX ON THE BASIS OF THE MAIN MIRROR OF THE SIBERIAN LIDAR STATION FOR MEASURING ATMOSPHERIC TEMPERATURE

<sup>1,2</sup>S.M. Bobrovnikov, <sup>1,2</sup>E.V. Gorlov, <sup>1</sup>V.I. Zharkov, <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.** В статье описывается методика и созданная аппаратура для проведения регулярных измерений вертикального профиля температуры атмосферы на основе совместного использования эффектов чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния ( $K_p$ ) и релеевского рассеяния на базе уникального оборудования Сибирской лидарной станции (СЛС). Представлена блок-схема лидарного комплекса на базе главного приемного зеркала СЛС диаметром 2.2 м. Была доработана система юстировки поворотного зеркала. Объединение лидарных технологий и внедрение их на СЛС позволит получить уникальный инструмент для изучения динамики температуры и аэрозольного наполнения атмосферы до высот 80 км. Проведена экспериментальная оценка величины подавления интенсивности в используемом полихроматоре.

**Ключевые слова:** ЛИДАР, температура, атмосфера, система фоторегистрации.

**Annotation.** The article describes the technique and equipment for regular measurements of the vertical profile of the atmosphere temperature on the basis of the joint use of the effects of pure rotational Raman spectrum and Rayleigh scattering on the basis of the unique equipment of the Siberian lidar station (SLS). Shows a block diagram of a lidar system at the main receiving SLS mirror diameter of 2.2 m was a modified alignment system rotating mirror. The combination of lidar technologies and their implementation on SLS will provide a unique tool for studying the dynamics of temperature and aerosol filling of the atmosphere up to 80 km. An experimental assessment of the intensity suppression value in the used polychromator was carried out.

**Keywords:** Lidar, polychromator, atmosphere, temperature, photoregistration system.

Проблема мониторинга физических параметров стратосферы имеет ключевое значение как при создании глобальных моделей атмосферной циркуляции, так и при оценке факторов изменения климата. Температура является важным метеорологическим параметром средней атмосферы, характеризующая происходящие в ней процессы [Radlach et al., 2008; Siying Chen et al., 2011]. Регулярные измерения вертикально профиля температуры осуществляется на мировой сети аэрологических станций. Лидарные методы позволяют получать информацию до высот почти 100 км, что приводит дистанционные лазерные методы определения оптических параметров атмосферы и температуры в частности, по существу, уникальными.

В этой работе мы описываем методику и созданную аппаратуру для проведения регулярных измерений вертикального профиля температуры атмосферы на основе совместного использования эффектов спонтанного комбинационного и релеевского рассеяния на базе уникального оборудования СЛС. Основная идея измерения температуры атмосферы до высот порядка 80 км заключается в объединении методики Рэлеевского и комбинационного рассеяния при использовании одного лазерного источника и приемника, что позволит нам восстанавливать профиль температуры атмосферы в большем диапазоне высот. По предварительным оценкам лидарного сигнала, использование методики Рэлеевского рассеяния позволит нам измерить температуру от 30 до 80 км [Keckhut et al., 1990; Alpers et al., 2004], а примене-

ние метода измерения температуры атмосферы с использованием чисто вращательного спектра  $K_p$  на молекулах атмосферного азота и кислорода делает возможным проведение измерений температуры на высотах до 35 км [Jingyu Jia, Fan Yi, 2014; Dukhyeon Kim, Hyunki Cha, 2007]. Эффект  $K_p$  является неселективным и не требует использования специальных источников излучения, поэтому длина волны лазерного источника может быть выбрана с учетом наилучших условий распространения излучения в атмосфере, с целью достижения максимальной дальности зондирования [Alpers et al., 2004; Cooney, 1972; Hinkley, 1976].

Коснемся кратко основных моментов идеологии функционирования лидарных систем. Блок-схема лидара приведена на рис. 1.

Импульс лазерного излучения направляется в атмосферу, при помощи поворотного зеркала, установленного на узле юстировки лазерного излучения собственной разработки, где излучение, в результате взаимодействия с аэрозольными и молекулярными компонентами среды, частично поглощается и рассеивается. Излучение, рассеянное в направлении назад, собирается приемным телескопом лидара и направляется в полихроматор для спектральной фильтрации и выделения температурно-чувствительных участков вращательного спектра комбинационного рассеяния. Оптический отклик на несмещенной частоте (Рэлеевское и Ми рассеяние), и оптические отклики, соответствующие выбранным участкам чисто вращатель-

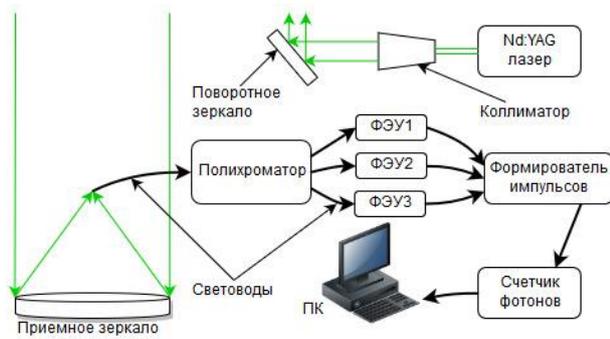


Рис. 1. Блок-схема лидарного комплекса ИОА СО РАН им. В.Е. Зуева

ных спектров  $K_p$  на молекулах азота и кислорода поступают на детекторы. В качестве фотодетекторов используются компактные фотоэлектронные умножители (ФЭУ) типа H10721P-210 компании «Hamamatsu» [<http://www.hamamatsu.com>]. Для регистрации сигналов применяется многоканальная система счета фотонов разработки ИОА СО РАН [Bobrovnikov et al., 2018].

Для проверки возможности автоматической настройки лидарного комплекса СЛС были проведены испытания шаговых двигателей поворотного зеркала в узле юстировки на предмет выявления плавности хода, при этом каждый шаговый двигатель был испытан на трех разных скоростях. Используются шаговые двигатели PL57H56-2.8-4 и FLS57STH56-1006A фирмы Purelogic соответственно. Технические характеристики используемых шаговых двигателей можно посмотреть на сайте [<http://www.purelogic.ru>].

Из полученных данных можно сделать вывод, что используемые шаговые двигатели имеют линейную характеристику без существенного гистерезиса и могут быть использованы в узле юстировки для тонкой настройки поворотного зеркала с целью направления лазерного излучения в атмосферу под нужным углом от нормали. В дальнейшем планируется реализовать их полную автоматизацию, для чего требуется написание соответствующего программного обеспечения, чему и будут посвящены дальнейшие исследования.

Экспериментально апробируем дифракционный полихроматор для проверки уровня подавления линии несмещенного рассеяния. Обычно, для измерения температуры в тропосфере с помощью чисто вращательного спектра  $K_p$  на молекулах азота и кислорода, используется двойной полихроматор [Keskhut et al., 1990; Alpers et al., 2004; Dukhyeon Kim, Nyungki Cha, 2007; Jinguu Jia, Fan Yi, 2014], это связано с высокой вероятностью появления большой концентрации аэрозольных частиц на пути лазерного импульса. В данной работе, для измерения температуры в стратосфере, планируется использовать одинарный полихроматор, поскольку вероятность появления большой концентрации аэрозольных частиц на пути лазерного импульса в стратосфере крайне мала. Использование одинарного полихроматора позволит увеличить пропускание оптического тракта лидара и, соответственно, уменьшит погрешность температурных измерений в стратосфере.

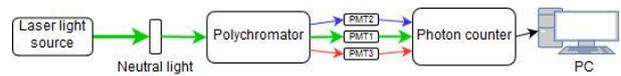


Рис. 2. Блок-схема лидарного комплекса ИОА СО РАН им. В.Е. Зуева

Для возможности использования одинарного полихроматора были проведены исследования подавления линии несмещенного рассеяния. На рис. 2 представлена блок-схема установки для исследования подавления линии несмещенного рассеяния. В качестве лазерного источника был использован узкополосный импульсный Nd:YAG DPSS лазер Cobolt Tor 400, работающий на длине волны 532 нм. Излучение по световоду передавалось на вход полихроматора. На выходе полихроматора выделяются четыре участка чисто вращательного спектра комбинационно рассеяния ( $J_4$  и  $J_{12}$  в стоксовой и антистоксовой областях) и один участок несмещенного рассеяния ( $J_0$ ), как это показано на рисунке. Линии с отрицательной и положительной зависимостью интенсивности от температуры объединяются вместе в один канал ( $J_{4\text{stokes}}$  и  $J_{4\text{antistokes}}$ , и  $J_{12\text{stokes}}$  и  $J_{12\text{antistokes}}$  соответственно). В области локализации спектра установлены три близко расположенных световода, по которым излучение выделенных участков спектра передается на фотокатоды счетных модулей ФЭУ фирмы Hamamatsu.

Для определения уровня подавления линии несмещенного рассеяния в полихроматоре для начала нужно измерить интенсивность фона рассеянного излучения на смещенных линиях ( $J_4$  и  $J_{12}$ ). Далее, уменьшая интенсивность лазерного излучения путем добавления нейтральных светофильтров перед входом полихроматора, добивались интенсивности несмещенного рассеяния равной интенсивности фона смещенного рассеяния без применения светофильтров. При одинаковых значениях сигналов смещенного и несмещенного рассеяния узнаем уровень подавления, вычислив пропускание нейтральных фильтров.

Проведя серию экспериментов по измерению сигналов смещенного и несмещенного рассеяния, был статистически обоснован уровень подавления полихроматора. Интенсивность фона  $J_4$  и  $J_{12}$  отличалась в 10 раз, тогда как интенсивность фона рассеянного излучения на линии  $J_4$  от несмещенного отличалась в 2200 раз и соответственно уровень интенсивности фона на линии  $J_{12}$  была меньше уровня интенсивности фона на несмещенной линии в 22000 раз меньше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при использовании одного лазерного источника и приемника, при использовании одинарного дифракционного полихроматора для спектральной селекции возможно совмещение методик чисто вращательного  $K_p$  и рэлеевского рассеяний для получения профиля температуры в диапазоне высот от приземного слоя до 80 км. Выполнена задача по доработке юстировочного узла поворотного зеркала, в частности были исследованы используемые шаговые двигатели на предмет плавности хода,

которые показали отсутствие гистерезиса, что в свою очередь делает возможным реализацию автоматической настройки лидарного комплекса. Были выполнены измерения по оценке уровня подавления интенсивности линий несмещенного рассеяния, которые показывают, что интенсивность фона рассеянного излучения в области линии J4 в 2200 раз меньше уровня фона несмещенного рассеяния, а интенсивность фона рассеянного излучения в области линии J12 в 22000 раз меньше уровня фона несмещенного рассеяния.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-1378.2019.5.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Alpers M., Eixmann R., Fricke-Begemann C., Gerding M., Hoffner J. Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 793–800.

Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Trifonov D.A., Zharkov V.I. Raman lidar for measuring the temperature of the stratosphere // *International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmos. Phys. Toms. Proc. SPIE.* 2018.

Cooney J. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter // *J. Appl. Meteorol.* 1972. V. 11, N 1. P. 108–112.

Dukhyeon Kim, Hyunki Cha. Rotational Raman lidar: design and performance test of meteorological parameters (aerosol backscattering coefficients and temperature) // *Journal of the Korean Physical Society.* 2007. V. 51, N 1. P. 352–357.

Hinkley E.D. *Laser monitoring of the atmosphere.* Springer-Verlag: New York. 1976.

Jingyu Jia, Fan Yi. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5–30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar // *Applied Optics.* 2014. V. 53, N 24. P. 5330–5343.

Keckhut P., Chanin M.L., Hauchecorne A. Stratosphere temperature measurement using Raman lidar // *Applied Optics.* 1990. V. 29, N 34. P. 5182–5186.

Radlach M., Behrendt A., Wulfmeyer V. Scanning rotational Raman lidar at 355nm for the measurement of tropospheric temperature fields // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 159–169.

Siyang Chen, Zongjia Qiu, Yinchao Zhang, He Chen, Yuzhao Wang. A pure rotational Raman lidar using double-grating monochromator for temperature profile detection // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2011. V. 112. Iss. 2. P. 304–309.

URL: <http://www.hamamatsu.com>.

URL: <http://www.purelogic.ru>.