

## СКР-ЛИДАР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В СТРАТОСФЕРЕ

<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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
trifonov@iao.ru

## THE RAMAN LIDAR FOR DETECTION OF FINE STRUCTURE OF TEMPERATURE STRATIFICATION IN THE STRATOSPHERE

<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

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

---

**Аннотация.** Для обнаружения тонкой структуры температурной стратификации в стратосфере в ИОА СО РАН разрабатывается СКР-лидар на основе чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния. Использование уникальной Сибирской Лидарной Станции (СЛС) в ИОА СО РАН с большим зеркалом диаметром 2.2 м позволит вести наблюдения за стационарными струйными течениями в стратосфере с помощью дистанционных измерений температуры атмосферы с высоким пространственным разрешением.

В статье обосновывается возможность реализации метода для одновременного измерения вертикального распределения температуры и аэрозольного наполнения атмосферы с использованием зеркала диаметром 2.2 м. Приводится блок-схема СКР-лидара и подробное описание основных узлов лидара.

**Ключевые слова:** лидар, комбинационное рассеяние света, атмосфера, температура.

**Abstract.** To detection of fine structure of the thermal stratification in the stratosphere at the IAO SB RAS is developed by the Raman-lidar based on the pure rotational Raman spectrum. Use of the unique Siberian Lidar Station in IOA SB RAS with a big mirror with a diameter of 2.2 m will allow to observe stationary jet streams in a stratosphere by means of remote measurements of temperature of the atmosphere with high spatial resolution.

In the article it is proved the possibility of implementing the method for simultaneously measuring the vertical distribution of temperature and aerosol filling of the atmosphere using on the mirror diameter of 2.2 m. The block-diagram of the Raman lidar and detailed description of primary units of the lidar are given.

**Keywords:** lidar, pure rotational Raman spectrum, atmosphere, temperature.

---

Скорости воздушных течений на высотах зависят главным образом от характера поля температуры ниже лежащих слоев воздуха. Чем больше горизонтальные градиенты температуры в системе высотной фронтальной зоны, тем сильнее струйное течение (СТ), указывающее на наличие сильных ветров в этой зоне. Иначе говоря, в формировании и эволюции СТ главную роль играет распределение температуры в атмосфере и возникающие горизонтальные градиенты температуры [Погосян, 1962].

СТ возникают в тропосфере и стратосфере. В стратосфере они наблюдаются временами при определенных условиях циркуляции зимой на высотах 25–30 км. СТ, причинно связанные с высотными фронтальными зонами, возникают, усиливаются или ослабевают вследствие возникновения и разрушения тропосферных фронтов. В первом случае в результате сближения холодных и теплых воздушных масс горизонтальные градиенты температуры, давления и скорости ветра возрастают. Во втором случае при удалении друг от друга холодного и теплого воздуха градиенты температуры и давления уменьшаются, ветры ослабевают [Погосян, 1962].

СТ можно обнаружить при помощи стратосферного аэрозоля, температуры атмосферы. На

высотах более 20 км аэрозоль отсутствует, кроме кратковременного содержания, вследствие взрывов мощных вулканов. Метод чисто вращательного спектра СКР позволяет довольно точно исследовать температурную структуру в атмосфере с небольшой погрешностью. Вследствие этого, струйные течения можно обнаружить и очень точно, при помощи изучения температуры атмосферы, так как температурная инверсия в стратосфере тесно связана со струйными течениями [Alpers M, 2004; Jinguo Jia, Fan Yi, 2014].

Метод на основе эффекта спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) позволяет получить одновременную пространственно-временную информацию о температуре и аэрозольном наполнении в атмосфере при использовании одного источника лазерного излучения. Кроме того, метод является неселективным и не требует использования специальных источников излучения, поэтому длина волны лазерного источника может быть выбрана оптимальным образом, исходя из оптических характеристик атмосферы [Хинкли, 1979].

На рис. 1 показана блок-схема СКР-лидара уникальной СЛС. В качестве источника излучения используется Nd:YAG лазер. Лазерное излучение, прошедшее через коллиматор (уменьшает расходи-

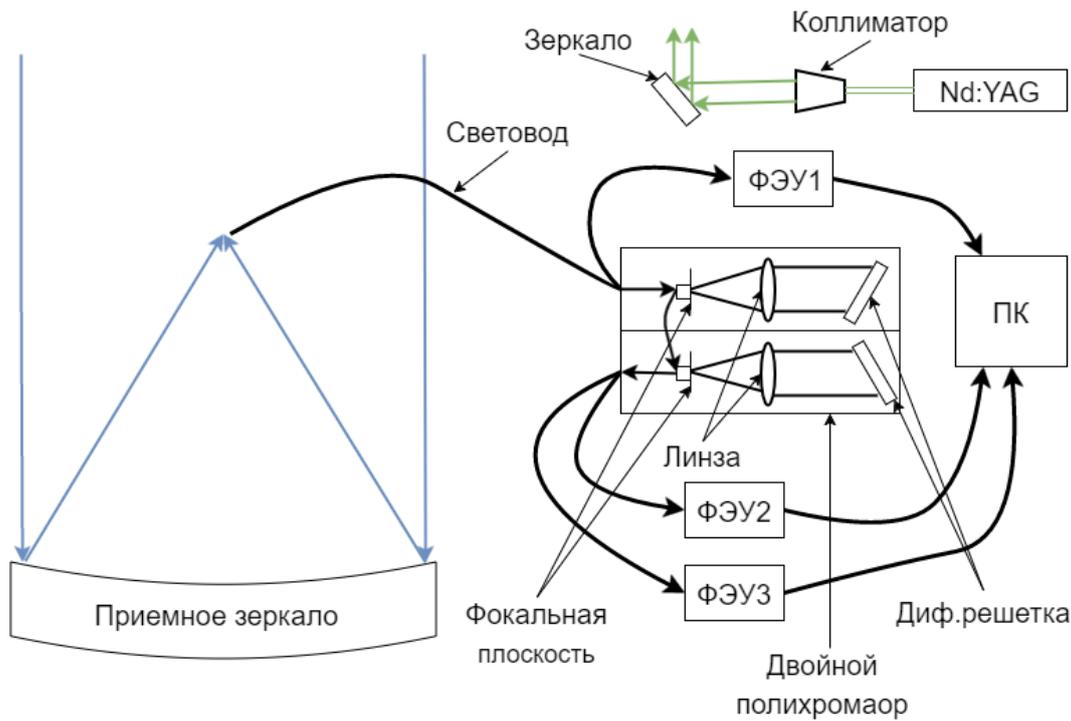


Рис. 1. Блок-схема СКР-лидара ИОА СО РАН им В.Е. Зуева

Технические характеристики СКР-лидара СЛС ИОА СО РАН

	Параметры лидара
Длина волны лазера, нм	532
Энергия импульса лазера, мДж	800
Частота следования лазера, Гц	30
Длительность импульса лазера, нс	4–8
Энергетическая стабильность лазера, ±%	3.5
Смещение мощности лазера, ±%	6
Расходимость лазера после коллиматора, мрад	0.05
Диаметр приемного зеркала, м	2.2
Фокусное расстояние приемного зеркала, м	10
Спектральный диапазон ФЭУ, нм	230–700
Длина волны с макс. чувствительностью ФЭУ, нм	400
Квантовая эффективность ФЭУ	0.163

мость лазерного излучения в 10 раз) при помощи поворотного зеркала направляется в атмосферу. Обратное рассеянное назад излучение (собирается приемным зеркалом диаметром 2.2 м и с помощью световода) направляется в двойной полихроматор собственной разработки. В первом блоке полихроматора происходит спектральное разделение собранного излучения. Излучение на несмещенной длине волны (рэлеевское и Ми-рассеяние) поступает на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ1) (измерение коэффициента обратного рассеяния), в то время как излучение чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота и кислорода проходит через второй блок полихроматора, и поступает на ФЭУ2 и ФЭУ3 (измерения температуры атмосферы). Сигнал регистрируется с помощью ФЭУ фирмы HAMAMATSU (H10721P-210). Регистрация сигналов проходит в режиме счета фотонов. В таблице приведены основные технические характеристики СКР-лидара.

Основная идея методики измерений температуры атмосферы используя чисто вращательный спектр КР атмосферных молекул заключается в анализе интенсивности температурно-чувствительных линий вращательного спектра [Cooney, 1972; Бобровников и др., 2015].

На рис. 2 показан вид чисто вращательного спектра КР азота для различных температур (250 К — штриховая линия, 350 К — сплошная линия) при возбуждении второй гармоники Nd:YAG лазера (532 нм). Интенсивность О-ветви с вращательными квантовыми числами возрастает выше 10 с ростом температуры; Однако, интенсивность для меньших квантовых чисел уменьшается. Следовательно, отношение этих двух различных интенсивностей, чьи квантовые числа больше или меньше 10, может быть использовано для получения информации о температуре азота из чистого вращательного спектра. [Dukhyeon Kim, 2001; Dukhyeon Kim, Hyungki Cha, 2007].

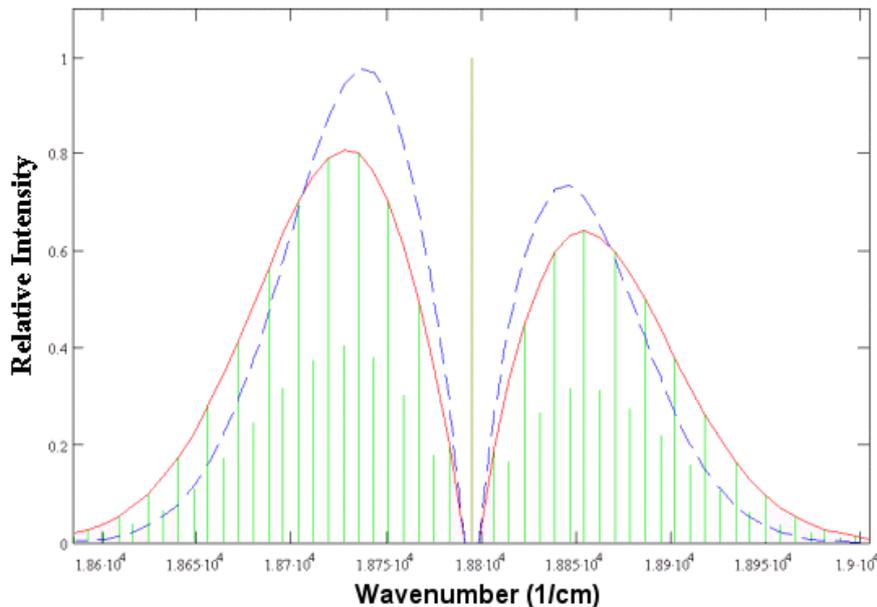


Рис. 2. Вид чистого вращательного комбинационного спектра азот для двух разных температур (250 К — штриховая линия; 350 К — сплошная линия), полученная с использованием возбуждения второй гармоники Nd:YAG лазера [Dukhyeon Kim, 2001]

Пространственно-разрешенные дистанционные измерения температуры атмосферы по спектрам комбинационного рассеяния атмосферных молекул реализованы в лидарном приложении методики, дополняющем изложенную здесь идею способом возбуждения и регистрации спектров рассеяния.

Используя данные приведенные в таблице, были произведены расчеты лидарного сигнала. Исходя из расчетов, до высоты 35 км с пространственным разрешением 1 км можем измерить температуру атмосферы с точность 1 °С, при накоплении сигнала 60 мин.

Теоретический расчет показал целесообразность использования СКР-лидара для измерения вертикального распределения температуры атмосферы. В дальнейшем планируется реализация рассматриваемой методики на СЛС для регулярного наблюдения за СТ атмосферы с помощью большого зеркала диаметром 2.2 м.

Регистрация температурно-чувствительных участков чисто вращательных спектра СКР на молекулах азота и кислорода позволит проводить исследование тонкой структуры температурной стратификации в стратосфере для обнаружения струйных течений в стратосфере с пространственным разрешением порядка 0.5–1 км, вследствие того, что температура является одним из главных факторов образования струйных течений.

### Список литературы

- Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Лидар для измерения вертикального распределения метеопараметров атмосферы // Труды XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Секция D. Физика атмосферы. БШФФ-2015. С. 302–303.
- Погосян Х.П. Воздушная оболочка Земли. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1962. 294 с.
- Хинкли Э.Д. Лазерный контроль атмосферы. М.: Мир, 1979. 416 с.
- 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. no. 4. P. 793–800.
- Cooney J. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter // J. Appl. Meteorol. 1972. V. 11, N 1. P. 108–112.
- Dukhyeon Kim, Hyungki Cha. Rotational Raman lidar: design and performance test of meteorological parameters (aerosol backscattering coefficients and temperature) // J. Korean Phys. Soc. 2007. V. 51, N 1. P. 352–357.
- Dukhyeon Kim, Hyungki Cha, Jongmin Lee, S. Bobrovnikov. Pure rotational Raman lidar for Atmospheric temperature measurements // J. Korean Phys. Soc. 2001. V. 39, N 5. P. 838–841.
- 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.