

ТЕХНИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ОПТИКЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.501

**В.Д. Бурлаков, В.В. Зуев, Г.С. Евтушенко, М.Ю. Катаев, С.В. Смирнов, В.О. Троицкий**

**ЛИДАР ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО ОЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ**

Для зондирования тропосферного озона по методу дифференциального поглощения предлагается лидар с использованием нетрадиционных пар лазерных линий: 271–289 нм (суммарная частота желтой и зеленой линий излучения лазера на парах меди и вторая гармоника желтой линии соответственно) и 289–308 нм (308 нм – длина волны излучения эксимерного ХеСl-лазера). Описываются результаты по исследованию эффективности генерации гармоник медного лазера в нелинейных кристаллах  $\beta$  – ВаВ<sub>2</sub>О<sub>4</sub>. Приводятся результаты численного моделирования возможностей рассматриваемого лидара для зондирования тропосферного озона.

**1. Введение**

В проблеме климато-экологического мониторинга атмосферы озон занимает особое место, поскольку играет значительную роль в экологии и в климате планеты. Актуальность исследований озона и компонентов озонного цикла особенно возросла в последнее десятилетие в связи с обнаружением <озонных дыр> и наблюдением в некоторых районах Европы устойчивого повышения содержания тропосферного озона.

Оперативную информацию о содержании озона во всей вертикальной толще атмосферы с необходимым пространственным и временным разрешением обеспечивают лидарные методы зондирования. Лидарное зондирование стратосферного озона в ИОА СО РАН (г. Томск, 56°с.ш., 85°в.д.) ведется с 1989 г. Измерения начинались на лидаре с приемным зеркалом диаметром 1 м [1]. В настоящее время измерения стратосферного озона с одновременным зондированием вертикального распределения аэрозоля проводятся на станции высотного зондирования атмосферы (СВЗА) с приемным телескопом диаметром 2,2 м [2]. Для исследования общей динамики атмосферного озона, процессов тропосферно-стратосферного обмена измерения стратосферного озона необходимо вести одновременно с измерениями озона в тропосфере. С этой целью нами разработан канал зондирования тропосферного озона на базе приемного зеркала диаметром 0,5 м, который дополняет канал зондирования стратосферы на СВЗА.

В настоящее время для целей лазерного зондирования как тропосферного, так и стратосферного озона в УФ-области спектра (полоса Хартли) в основном используются эксимерные ХеСl-, ХеF-, КrF-лазеры и генераторы 4-й гармоники Nd: YAG-лазера в сочетании с техникой вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [2,3]. Энергия в импульсе этих лазеров достигает 100 мДж при частоте следования 10–100 Гц. При этом при регистрации лидарных эхосигналов на высокочувствительные ФЭУ в режиме счета фотонов, вследствие засветки ФЭУ мощным отраженным сигналом от ближней зоны зондирования, возникает эффект последствия ФЭУ, который ведет к просчету фотонов в большом динамическом диапазоне лидарных эхосигналов и искажению всей формы сигнала. Поэтому для зондирования тропосферного озона возможно использование лазерных источников с меньшей энергией в импульсе, но с большей (~1 кГц) частотой следования импульсов, что обеспечивает малое время (несколько минут) накопления сигнала в режиме счета фотонов.

Основываясь на полученных в Институте оптики атмосферы результатах исследования генерации гармоник излучения лазера на парах меди (ЛПМ) в нелинейных кристаллах [4], предложен лидар для зондирования тропосферного озона с использованием нетрадиционных лазерных линий. В качестве таких линий для зондирования по методу дифференциального поглощения выбраны: 289 нм – вторая гармоника излучения желтой (578) линии ЛПМ и 271 нм – суммарная частота зеленой (511) и желтой линий ЛПМ. Высокая частота повторения

импульсов генерации ЛПМ (6–10 кГц) при малой энергии в импульсе излучения делают этот лазер наиболее удобным для зондирования в режиме счета фотонов в условиях малых фонов, которые характерны для зондирования тропосферного озона при  $\lambda < 300$  нм.

## 2. Экспериментальные результаты по исследованию генерации гармоник излучения ЛПМ

Основные факторы, определяющие эффективность генерации гармоник, – это импульсная мощность излучения на основной частоте накачки, расходимость лазера накачки и нелинейные свойства самого кристалла. Для мощных твердотельных лазеров (импульсная мощность единицы и десятки мегаватт) реализуется КПД преобразования 60% и более. Для типичных ЛПМ (импульсная мощность десятки киловатт) прогресс по увеличению эффективности преобразования наблюдается весьма медленный [5,6], для генерации второй гармоники (ГВГ) зеленой линии ЛПМ в нелинейных кристаллах  $\beta$  –  $\text{BaV}_2\text{O}_4$  (ВВО) получен КПД  $\sim 9\%$  [6].

Схема наших экспериментов по преобразованию излучения ЛПМ в ГВГ и суммарную частоту представлена на рис. 1.

Лазер накачки для преобразования каждой из линий излучения был выполнен по системе <задающий генератор (ЗГ) – усилитель>. ЗГ включает в себя газоразрядную трубку 5 и неустойчивый телескопический резонатор, который образован полностью отражающими сферическими зеркалами 2 и 4 с фокусными расстояниями 6 и 100 см соответственно и плоским выходным зеркалом 3 с отверстием. Необходимая поляризация излучения обеспечивалась призмой Глана 1. Далее излучение ЗГ проходит через зеркальный пространственный фильтр-коллиматор (ЗПФК), который выделяет требуемую по расходимости компоненту излучения и состоит из конфокально установленных зеркал 6 и 7 с фокусными расстояниями 60 и 150 см и диафрагмы 8, помещенной в фокусе этих зеркал. Максимальная эффективность преобразования в наших экспериментах была получена при диаметре диафрагмы 50 мкм. Поворотным зеркалом 9 излучение направляется в усилитель 10.

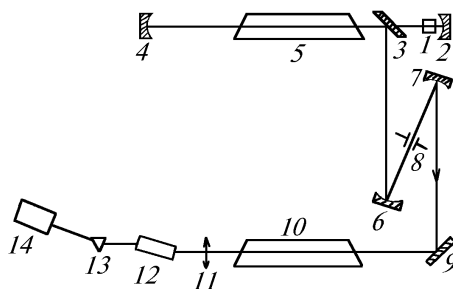


Рис. 1. Схема установки по преобразованию излучения лазера на парах меди в нелинейном кристалле

В качестве ЗГ и усилителя применялись газоразрядные трубки типа <Кулон> (длина активной зоны 30 см, диаметр 1,2 см) и <ГЛ-201> (длина 75 см, диаметр 2 см) соответственно. Запуск ЗГ осуществляется через кабельную линию задержки.

Линзой 11 с фокусным расстоянием 150 см излучение фокусировалось в центр нелинейного кристалла ВВО 12 размером  $4 \times 4 \times 6$  мм<sup>3</sup>, вырезанного под углами  $\theta = 48^\circ$  и  $\phi = 90^\circ$ . Синхронное <ооо> взаимодействие обеспечивается подстройкой кристаллов по углу  $\theta$ . Для выделения линий генерации использовалась кварцевая призма 13 и набор светофильтров. Мощность излучения регистрировалась на ИМО-2Н 14.

В процессе экспериментов менялись коэффициент увеличения зеркал ЗПФК, радиус диафрагмы ЗПФК, фокусное расстояние линзы 11. Оптимальные величины этих параметров приводились выше. Получены КПД преобразования во вторую гармонику до 25% и в суммарную частоту до 14%.

## 3. Результаты численного моделирования зондирования тропосферного озона

Полученная эффективность преобразования позволила реализовать приемлемые для зондирования тропосферного озона параметры генерации: средняя мощность излучения на каждой из линий 0,3 Вт при частоте следования 7 кГц и расходимости излучения  $\sim 0,2$  мрад.

Канал зондирования тропосферного озона разработан на базе приемного зеркала диаметром 0,5 м. Он дополняет канал зондирования стратосферного озона на СВЗА с использованием излучения эксимерного ХеСl-лазера. Поэтому нами рассматривалась возможность зондирования озона по методу дифференциального поглощения на парах линий 271–289 и 289–308 нм. Параметры разработанного лидара приведены в таблице.

Технические характеристики лидара				
Передатчик				
Лазер	$\lambda$ , нм	$E$ , мДж	$P_{\text{ср}}$ , Вт	$f$ , Гц
Cu	289		0,3	$7 \cdot 10^3$
Cu	271		0,3	$7 \cdot 10^3$
ХеСl	308	50		50
Расходимость 0,2 мрад				
Приемник				
Диаметр зеркала, м			0,5	
Фокусное расстояние, м			1,5	
Поле зрения, мрад			0,5	
Фотоприемники			ФЭУ-130, ФЭУ-142	
Режим счета фотонов				
Пространственное разрешение, м			100	

Приемный телескоп выполнен по схеме Ньютона. В фокальной плоскости телескопа располагается кювета спектральной селекции сигнала, состоящая из коллимирующей и фокусирующей оптики, спектроделительных зеркал, интерференционных фильтров и ФЭУ. Регистрация сигналов ведется в режиме счета фотонов.

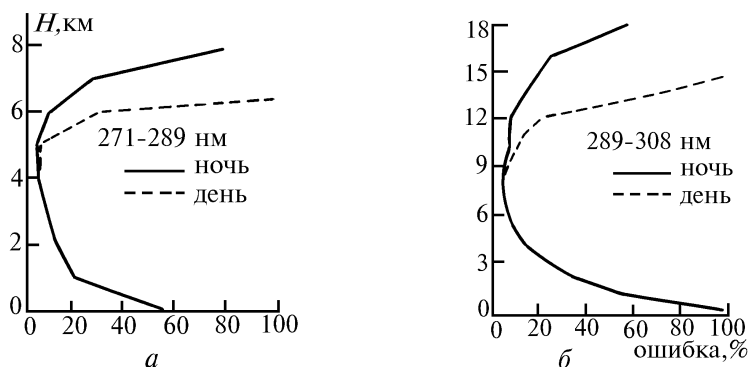


Рис. 2. Результат численного моделирования ошибки зондирования озона на длинах волн 271 – 289 (а) и 289 – 308 нм (б)

Для приведенных в таблице параметров лидара, с учетом пропускания спектральных элементов и чувствительности ФЭУ, было проведено численное моделирование зондирования озона. Результаты в виде взаимозависимости ошибки и высотного интервала зондирования представлены на рис. 2. Как видно, комплексное использование всех трех линий излучения позволит проводить измерения озона днем в интервале высот 3–7 км и ночью в интервале 3–12 км.

Кроме того, рассматривается возможность параллельного измерения сигналов КР на длинах волн 323 нм (сигнал КР от молекул  $\text{H}_2\text{O}$  для линии 289 нм) и 310 нм (сигнал КР от молекул  $\text{N}_2$  для линии 289 нм), что позволит восстанавливать профиль влажности. Результаты численного моделирования зондирования влажности по измерению сигналов КР представлены на рис. 3. Как видно, возможны измерения до 8 км ночью и 3 км днем.

Отметим, что все расчеты по моделированию проводились для времени на накопления сигналов 10 мин. По крайней мере, для ночного зондирования эту цифру можно значительно увеличить. В настоящее время ведутся работы по запуску лидара в режим измерений.

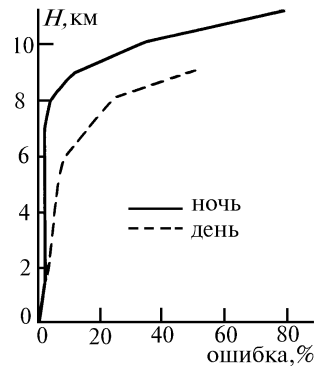


Рис. 3. Результат численного моделирования ошибки зондирования паров воды по КР-сигналам

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93–05–9383).

1. Ельников А.В., Маричев В.Н., Щелевой К.Д. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. №4. С. 117–123.
2. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зувев В.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №10. С. 1022–1027.
3. Nakane H., Hayashida S. et al. // Abstract of papers 16 ILRC. July 20–24. 1992. P. 23–26.
4. Троицкий В.О. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. №6. С. 666–671.
5. Coutts D.W., Ainsworth M.D., Piper J.A. // IEEE J. of Quant. Elect. 1989. V. 25. №9. P. 1985–1987.
6. Kuroda K., Shimura T., Omatsu T. et al. // In Tech. Dig. Conf. Lasers Electro. Opt. Soc. Amer. Washington DC. 1988. Paper WV 4.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
г. Томск

Поступила в редакцию  
15 июля 1994 г.

V.D. Burlakov, V.V. Zuev, G.S. Evtushenko, M.Yu. Kataev, S.V. Smirnov, V.O. Troitskii. **Lidar for Tropospheric Ozone Sounding Using Nonlinear Conversion of Copper vapor Laser Emission.** For tropospheric ozone sounding by the differential absorption method a lidar is proposed with the use of nontraditional pairs of laser spectral lines: 271 – 289 nm (summarized frequency of yellow and green radiation lines of copper vapor laser and second harmonic of yellow line, respectively) and 289 – 308 nm (308 nm is the wavelength of the excimer XeCl laser radiation). The paper presents the results of investigation of the efficiency of CVL harmonic generation in nonlinear crystals of  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as well as the results of numerical simulation of potentialities of the lidar under study for tropospheric ozone sounding.