

Лидар дифференциального поглощения для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере

В.В. Зуев, В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.В. Невзоров*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 12.05.2008 г.

С целью исследования динамики озона в районе тропопаузы, в том числе для изучения процессов стратосферно-тропосферного обмена на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН в г. Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.), разработан лидар для измерений распределения концентрации озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере. Зондирование осуществляется по методу дифференциального поглощения и рассеяния на паре длин волн 299/341 нм, соответственно первая и вторая стоксовы компоненты преобразования излучения накачки Nd:YAG-лазера (266 нм) на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в водороде. На лидаре с приемным зеркалом диаметром 0,5 м реализовано зондирование озона в диапазоне высот 5–18 км.

Ключевые слова: стратосфера, тропосфера, стратосферно-тропосферный обмен, озон, лидар.

Функционирующий на Сибирской лидарной станции (СЛС) ИОА СО РАН канал зондирования вертикального распределения озона (ВРО) в стратосфере методом дифференциального поглощения (ДП) основан на использовании излучения эксимерного Хе–Сl-лазера (308 нм) в комбинации с первой стоксовой компонентой его преобразования на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в водороде (353 нм). Получаемые лидарные сигналы на длинах волн 308 (on) и 353 нм (off) обеспечивают концентрационную чувствительность метода ДП, достаточную для определения концентрации стратосферного озона на высотах 13–35 км, т.е. в слое с максимальным содержанием озона, где его концентрация составляет $(2\div 6) \cdot 10^{12}$ мол./см³.

Длительный период лидарных наблюдений за стратосферным озоном с 1989 г. показал, что наиболее значимая часть для исследований озоносферы расположена в нижней стратосфере, где озон подвержен влиянию динамического фактора. Эта часть полностью определяет изменчивость общего содержания озона в атмосферном столбе. В этой же части разыгрываются слабо изученные сценарии стратосферно-тропосферного обмена, деформации озоносферы струйными течениями, формирование тонкой «языковой» структуры озонового слоя. Но для таких исследований в высотных диапазонах верхняя тропосфера – нижняя стратосфера требуется большая концентрационная чувствительность лидарных измерений, т.е. необходимо переходить в более коротковолновую область УФ-спектра, где сечение поглощения озоном больше.

* Владимир Владимирович Зуев (ref_zuev@iao.ru); Владимир Дмитриевич Бурлаков (burlakov@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgi@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru).

1. Оценки возможностей зондирования озона в тропосфере – стратосфере на паре длин волн 299/341 нм

Для тропосферных измерений озона обычно используются эксимерный KrF-лазер (248 нм) или 4-я гармоника Nd:YAG-лазера (266 нм) в сочетании с техникой ВКР-преобразования в H₂, D₂, CO₂ и других газах [1–4]. Наиболее распространенными являются водород и дейтерий. Возможный набор длин волн, соответствующих первым, вторым и третьим стоксовым (С) частотам ВКР-преобразования в H₂, D₂ и CO₂, представлен в таблице.

Длины волн, соответствующие стоксовым частотам ВКР-преобразования излучения на 266 и 248 нм в водороде, дейтерии и двуокиси углерода

Излучение накачки	Длины волн (нм), соответствующие стоксовым частотам ВКР-преобразования						
	в водороде		в дейтерии			в двуокиси углерода	
	C1	C2	C1	C2	C3	C2	C3
Nd:YAG, 266 нм	299	341	289	316	–	287	299
KrF, 248 нм	277	313	268	292	319	–	–

В различных высотных диапазонах тропосферы и нижней стратосферы используются различные комбинации длин волн. Так, пары длин волн 289/316 и 287/299 нм позволяют получать профиль озона до высот около 10 км [1, 2]; пара 292/319 нм – до высот 14–16 км [3]; пары 277/313 и 292/313 нм – до высот 8–12 и 15 км соответственно [4].

Нами были проведены предварительные численные оценки возможностей зондирования ВРО

в верхней тропосфере – нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм. Длина волны $\lambda_{\text{он}} = 299$ нм приходится на область полосы поглощения озона с сечением поглощения $\sigma_{299} = 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$, что в 3 раза выше, чем сечение поглощения на длине волны 308 нм, $\sigma_{308} = 1,4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$. Максимальная высота зондирования определяется прежде всего дальностью регистрации сигнала на $\lambda_{\text{он}}$, которая всегда меньше, чем дальность регистрации сигнала на $\lambda_{\text{офф}}$, вследствие большего поглощения озоном. С этой стороны $\lambda_{\text{он}} = 299$ нм предпочтительнее, чем 277 или 292 нм. Длины волн 299 и 341 нм реализуются в одном пучке зондирования (в одной ВКР-ячейке), в отличие, например, от пары 292/313 нм. При этом система на основе ВКР-ячейки с водородом дешевле, чем на дейтерии. Необходимо также учитывать техническую возможность спектрального разделения на приеме сигналов от близко расположенных длин волн.

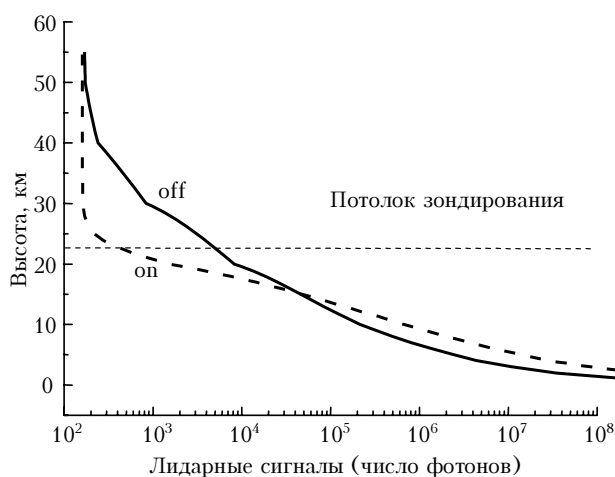


Рис. 1. Рассчитанные лидарные сигналы, накопленные за 1,5 ч, на длинах волн 299 (on) и 341 нм (off)

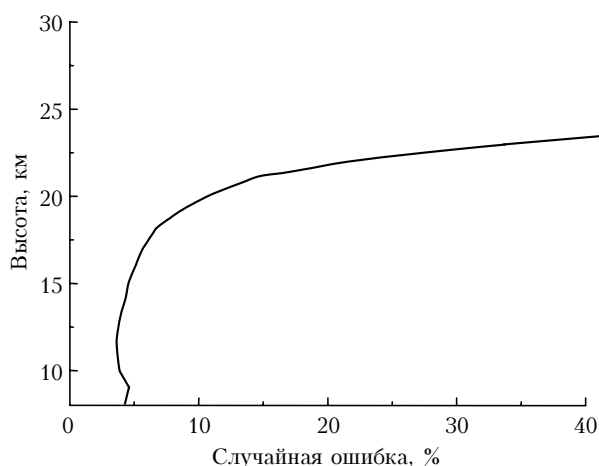


Рис. 2. Ошибка определения концентраций озона из сигналов на рис. 1

При расчетах закладывались реальные параметры лидара: энергия излучения на обеих длинах волн – 20 мДж; частота повторения лазерных импульсов – 15 Гц; диаметр приемного зеркала – 0,5 м;

время накопления сигнала – 1,5 ч. Для определения эффективности приемопередатчика использовались реальные значения пропускания оптических элементов спектральной селекции и эффективности ФЭУ, шумы брались из реальных измерений УФ-лидаром на базе Хе–Сl-лазера. На рис. 1 и 2 показаны рассчитанные лидарные сигналы (on и off) и ошибки определения концентраций озона соответственно.

Расчеты показали, что использование $\lambda_{\text{он}} = 299$ нм, на которой σ больше, чем на $\lambda_{\text{он}} = 308$ нм, сказалось на снижении потолка зондирования примерно до 22 км (озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км), но при этом появилась возможность измерений озона в тропосфере. Ошибка определения концентрации озона находится в пределах 4–10% до высот около 20 км.

2. Техническое описание лидара

На рис. 3 приведена блок-схема разработанного лидара. В качестве источника лазерного излучения используется 4-я гармоника (266 нм) основной частоты излучения Nd:YAG-лазера (модель LS-2134UT фирмы LOTIS ТП, Минск) с последующим ее ВКР-преобразованием в водороде в первую (299 нм) и вторую (341 нм) стоксовы компоненты.

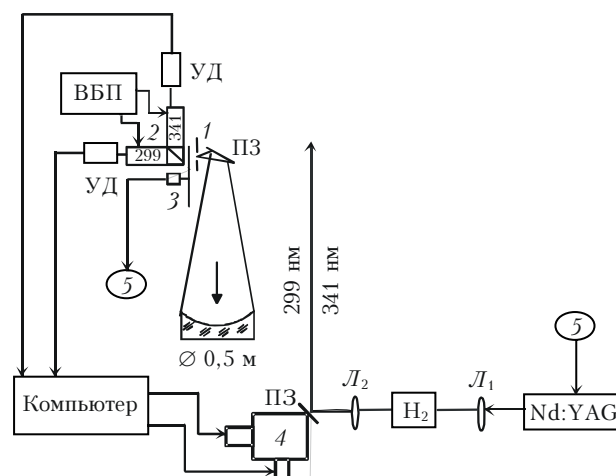


Рис. 3. Блок-схема лидара: 1 – полявая диафрагма; 2 – кювета спектральной селекции с ФЭУ; 3 – механический обтюратор; ПЗ – поворотные зеркала; 4 – автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала; Nd:YAG – твердотельный лазер; H₂ – ячейка ВКР-преобразования с водородом; УД – усилители-дискриминаторы; ВВП – высоковольтные блоки питания; L₁, L₂ – линзы; 5 – система синхронизации времени срабатывания обтюратора и послылки лазерных импульсов

Приемный телескоп разработан по схеме Ньютона на основе главного зеркала диаметром 0,5 м с фокусным расстоянием 1,5 м. Регистрирующий тракт лидара укомплектован фотоумножителями (R7207-01) и усилителями-дискриминаторами (С3866) фирмы HAMAMATSU. Регистрация лидарных сигналов ведется в режиме счета импульсов фототока.

Для обеспечения линейных режимов работы ФЭУ используется механический обтюратор, который

отсекает мощный оптический сигнал от ближней зоны зондирования. Автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала разработан на основе шаговых двигателей с управлением от компьютера.

ВКР-ячейка изготовлена из трубы (нержавеющая сталь) с внутренним диаметром 3 см и длиной 1 м. Входное и выходное окна изготовлены из кварца КУ. Энергия импульса накачки на длине волны 266 нм составляет 60 мДж. Необходимая для получения эффекта ВКР-преобразования плотность мощности накачки обеспечивается линзой L_1 с фокусным расстоянием 1 м, которая устанавливается перед ВКР-ячейкой и фокусирует излучение на ее центр. После ячейки конфокально с фокусирующей линзой устанавливается коллимирующая линза L_2 .

Была определена эффективность ВКР-преобразования в зависимости от давления водорода в ячейке. Давление водорода в ячейке изменялось от 1 до 9 атм. Полученная на выходе из ВКР-ячейки зависимость относительных интенсивностей излучения накачки (266 нм), первой (299 нм) и второй (341 нм) стоксовых компонент ВКР-преобразования от давления водорода представлена на рис. 4.

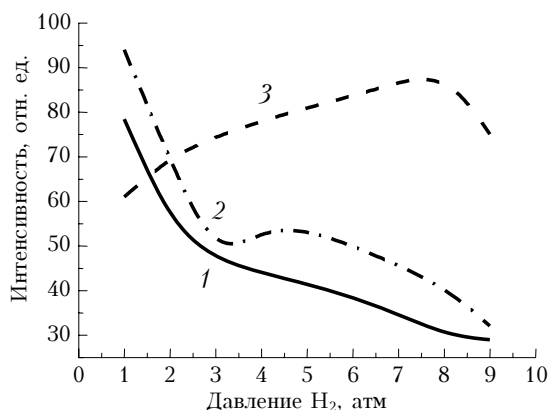


Рис. 4. Зависимость относительных интенсивностей излучения накачки (1 – 266 нм), первой (2 – 299 нм) и второй (3 – 341 нм) стоксовых компонент ВКР-преобразования от давления водорода

При давлении водорода 2 атм интенсивности линий 299 и 341 нм сравниваются, что дает возможность зондирования озона при равных энергетиках излучения на этих длинах волн. Однако для увеличения потолка зондирования более эффективно использовать давление 1 атм, так как при этом энергетика перераспределяется в пользу линии 299 нм, которая сильнее поглощается озоном, чем линия 341 нм.

3. Первые результаты измерений

Вид лидарных сигналов и восстановленный профиль концентрации озона представлены на рис. 5. Сигналы регистрировались в режиме счета импульсов фототока по 25 000 выстрелов (время накопления ~ 30 мин).

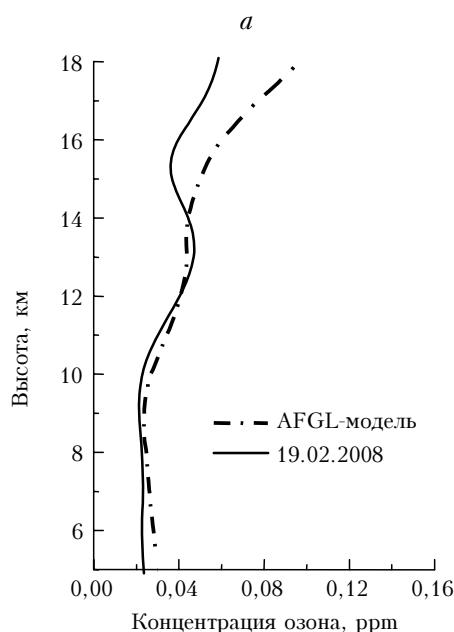
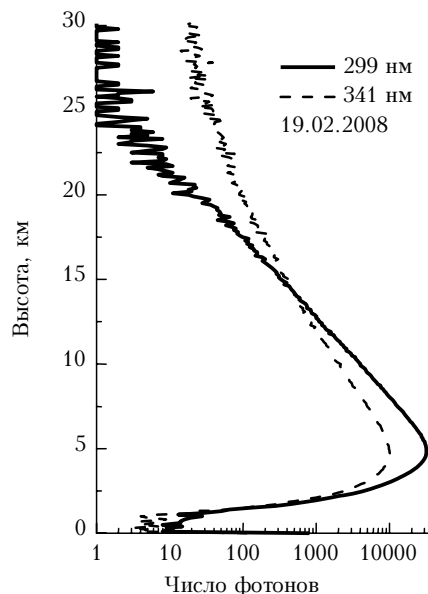


Рис. 5. Лидарные сигналы (а) и восстановленный профиль концентрации озона (б), полученный 19.02.08. Накопление сигналов по 25 000 выстрелов лазера

Достигнутый потолок регистрации сигналов на длине волны 299 нм составил более 20 км. Профиль ВРО (рис. 5, б) приведен в сравнении со среднеширотной зимней AFGL-моделью [5]. В диапазоне высот 5–14 км восстановленный профиль и модельная кривая достаточно хорошо совпадают. Выше 14 км измеренный профиль отличается от модельного, что является естественным для динамики озона в отдельные дни наблюдений.

Таким образом, результаты лидарных измерений на длинах волн 299 и 341 нм согласуются с модельными оценками, которые указывают на приемлемые точности зондирования озона в диапазоне высот около

5–20 км. В настоящее время ведутся работы по оптимизации оптических и фотоэлектронных элементов системы регистрации лидарных сигналов с целью повышения потолка зондирования и улучшения точности измерений. Возможно также увеличение времени накопления лидарных сигналов.

В заключение можно отметить, что для зондирования озона в области высот 5–20 км лидар на основе Nd:YAG-лазера предпочтительнее, чем лидар на основе эксимерного KrF-лазера, который дороже, более сложен в эксплуатации, требует особо чистых газов для рабочей смеси, частой очистки или замены резонаторной оптики.

Авторы выражают благодарность М.Ю. Катаеву за помощь в обработке первоначальных результатов измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (контракт № 02.518.11.7088) и интеграционного проекта СО РАН № 3.14.

1. Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos C., Papayannis A., Wemli H., Gerasopoulos E. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 12. P. STA12/1–STA12/10.
2. Nakazato M., Nagai T., Sakai T., Hirose Y. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide // *Appl. Opt.* 2007. V. 46. N 12. P. 2269–2279.
3. Букреев В.С., Варпанетов С.К., Веселовский И.А., Галустов А.С., Ковалев Ю.М., Прохоров А.М., Светогоров Е.С., Хмелевцов С.С., Лу Ч.Х. Лидарная система для зондирования стратосферного и тропосферного озона на основе эксимерных лазеров // *Квант. электрон.* 1994. Т. 21. № 6. С. 591–596.
4. Eisele H., Scheel H.E., Sladkovic R., Trickl T. High resolution lidar measurements of stratosphere – troposphere exchange // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. N 3. P. 319–330.
5. McClatchey R.A., Fenn W., Selby J.E.A., Volz F.E., Garin J.S. Optical properties of the atmosphere. AFGL-71-0279. Air Force Cambridge Res. Laborat. 1971. 85 p.

V.V. Zuev, V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, A.V. Nevzorov. **Differential absorption lidar for ozone sensing in the upper troposphere – lower stratosphere.**

To investigate the ozone dynamics in the tropopause region and, in particular, to study the processes of stratospheric – tropospheric exchange at Siberian Lidar Station of Institute Atmospheric Optics SB RAS in Tomsk (56.5°N, 85.0°E), we developed a lidar for measurements of ozone distribution in the upper troposphere – lower stratosphere. The sensing is performed using the method of differential absorption and scattering at the pair of wavelengths 299/341 nm, respectively, which are the first and second Stokes components of Raman cell (RC) transformed frequency of the pumping line of Nd:YAG laser at 266 nm in hydrogen. Using lidar with the receiving mirror 0.5 m in diameter, we realized the ozone sensing in altitude range 5–18 km.