

УДК 621.373.826 + 543.42

О КОНЦЕПЦИИ ЛИДАРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГИДРОКСИЛА В АТМОСФЕРЕ

Г. С. Голицын, И. Н. Князев, А. М. Прохоров, В. В. Савранский

Рассмотрена концепция и проведены оценки основных параметров лидара для высокочувствительного дистанционного измерения концентрации радикала ОН в стратосфере и тропосфере.

В последнее время установлена ключевая роль гидроксила в физико-химических процессах в атмосфере [1], определяющих локальную и глобальную способность атмосферы к самоочищению. Однако из-за крайне низкой концентрации гидроксила в атмосфере, особенно в нижних ее слоях, регулярные измерения гидроксила до сих пор не проводятся и средств для проведения таких измерений во всей толще атмосферы нет, несмотря на значительные усилия, предпринятые в этом направлении [2 – 8].

В настоящей работе кратко рассмотрена концепция и проведены оценки основных параметров наземного лидара для высокочувствительного дистанционного измерения концентрации ОН в стратосфере на высоте 30 – 90 км и в тропосфере на высоте 10 км с использованием одно- и двухступенчатого возбуждения ОН соответственно.

Для измерений гидроксила в стратосфере оптимальной является схема с возбуждением ОН в коротковолновом крыле полосы поглощения (0,0) в области 308 нм с регистрацией флуоресценции в длинноволновой части этой же полосы в области около 310 нм или на слабой полосе (0,1) в области 347 нм. В табл. 1 приведены некоторые параметры стратосферного ОН-лидара для высоты зондирования 50 км, полученные, исходя из обычного лидарного уравнения, с использованием численных данных [9 – 12] для системы с умеренными параметрами (диаметр приемного зеркала 60 см; ХеСІ лазер с шириной линии излучения $0,15 \text{ см}^{-1}$, энергией лазерного импульса 100 мДж и частотой повторения 100 Гц; квантовая эффективность приемника излучения 0,4; продольное разрешение 10 км, время накопления сигнала 5 мин). В подзаголовке таблицы использованы краткие обозначения спектроскопических схем лидара (длина волны

возбуждения/длина волны флуоресценции). Звездочкой отмечен столбец с данными для дневных измерений. Фон рассеянного солнечного излучения приведен для вертикальной ориентации лидара в полдень, в декабре-январе для широты местности 37° . В последней строке таблицы приведена средняя концентрация лазерно-индуцированного OH , образующаяся в зоне измерений за время накопления сигнала с учетом диффузии газа из измеряемого объема и для ветра 10 м/с (в скобках).

Т а б л и ц а 1
Некоторые параметры стратосферного OH -лидара ($h = 50 \text{ км}$)

Параметр	308/310 нм*	308/310 нм	308/348 нм
Оптическое пропускание атмосферы и приемной системы	0,011	0,011	0,036
системы спектральных фильтров для флуоресцентного излучения	0,26	0,13	0,8
рассеянного рэлеевского излучения	0,01	0,0001	0,0001
Угловая апертура лидара, <i>мрад</i>	0,01	0,3	0,3
число фотоотчетов флуоресценции	$6,8 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^3$	250
рассеянного рэлеевск. лаз. изл.	1900	19	19
расс. вращат. комбинац. изл.	460	230	—
рассеянного солнечно. излучения	$3,1 \cdot 10^4$	—	—
Отношение сигнала к шуму	180	57	15
чувствительность регистрации OH , см^{-3}	$7 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
концентрация лазерно-индуцир. OH , см^{-3}	$1,5 \cdot 10^2$ (22)	33 (0,7)	33 (0,7)

Как видно из табл. 1, для ночных измерений особых требований к диаграмме направленности лидара нет, а дневные измерения в полдень требуют высокой диаграммы направленности. Концентрация лазерно-индуцированного OH в зоне измерений в обоих случаях на 2 – 4 порядка ниже минимальной измеряемой концентрации OH .

Как показывает анализ, область высот менее 20 – 25 км, а особенно тропосфера, вероятнее всего будут недоступны для лидара с одноступенчатым возбуждением OH из-за чрезмерно высокой интенсивности рэлеевского, вращательного и колебательного рассеяния лазерного излучения, а также из-за уменьшения квантовой эффективности флуоресценции OH в нижних слоях атмосферы, связанного с тушением.

Для практической реализации схемы двухступенчатого возбуждения OH в лидарной системе необходимы лазеры с достаточно высокой энергией импульса излучения. Нами

найлены весьма точные совпадения волновых чисел переходов гидроксила в инфракрасной полосе поглощения (1,0) [9] и переходов HF лазера [13] в области относительной прозрачности атмосферы в интервале 2,85 – 3,05 мкм. Данные о поглощении паров воды на переходах HF лазера приведены в [14].

Т а б л и ц а 2

Параметры тропосферного лидара с двухступенчатым возбуждением OH

Параметры	ИК канал	УФ канал		
		3 мкм/ /347 нм/ /308 нм	3 мкм/ /313 нм/ /308 нм	3 мкм/ /313 нм/ 282 нм
Переходы OH	$Q_{12}2(0,0)$	$P_{12}(0,1)$	$Q_{12}(1,1)$	$Q_{12}(1,1)$
Длина волны	2,8888 мкм	346,92 нм	313,71 нм	313,71 нм
Энерг. насыщ., Дж/см ²	2,2	0,17	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Лазерное излучение	$HF P(4)(3,2)$	$HeCl$ в HD	KrF в H_2	KrF в H_2
Длительн. имп., нс	75	15	1	0,2
Энергия имп., Дж	до 20	0,3	0,04	0,04
Квант. выход. флуор.		$1,1 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Спектр. сдвиг		-39 нм	-600 см^{-1}	-31 нм
Пропуск. фильтров		$2,5 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$
Чувств. измер., см ⁻³			$5 \cdot 10^3$ (5 км)	$4,2 \cdot 10^5$ (4 км)
Лаз.-инд. OH , см ⁻³			$3,9 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^4$

В табл. 2 приведены некоторые параметры лидара для тропосферных измерений гидроксила с использованием трех схем. Тропосферный лидар с указанными параметрами должен быть снабжен приемным и передающим зеркалами диаметром 90 см и 35 см соответственно при времени накопления сигнала 20 мин. В качестве примера для первой (ИК) ступени возбуждения для всех трех схем выбран переход $Q_{12}2(0,0)$, имеющий отстройку от линии $P(4)(3,2)$ HF лазера всего $0,03 \text{ см}^{-1}$. Имеется еще 4 достаточно точных совпадения. В таблице использованы краткие обозначения спектроскопических схем (длина волны ИК возбуждения OH в мкм/длина волны УФ возбуждения в нм/длина волны флуоресценции в нм). Схема для дневных измерений отмечена звездочкой. В таблице приведена энергия насыщения для колебательных переходов в целом для ИК и УФ ступеней. Данные для схемы 3 мкм/313 нм/282 нм приведены для

измерений в полдень летом, а для двух остальных схем – для измерений зимой поздним вечером или ночью. В строке лазерное излучение для эксимерных лазеров указан газ в ВКР-преобразователях. В таблице приведен спектральный сдвиг флуоресценции относительно лазерного излучения, пропускание системы фильтров для рэлеевской компоненты, чувствительность измерения концентрации $ОН$ (в скобках указана высота) и концентрация лазерно-индуцированного гидроксила в измеряемом объеме к концу лазерного импульса.

Особенностью всех схем является перевод флуоресценции в антистоксову часть спектра с достаточно большим спектральным сдвигом, где интенсивность рассеянного излучения намного ниже, чем в стоксовой области.

Для дневных измерений наиболее пригодна двухступенчатая схема $3\text{ мкм}/313\text{ нм}/282\text{ нм}$ с последовательным возбуждением гидроксила HF лазером в области $3,0\text{ мкм}$ и второй стоксовой компонентой KrF лазера в H_2 в области $313,5\text{ нм}$, с регистрацией флуоресценции в области 282 нм , где фон прямого и рассеянного солнечного, лунного и звездного излучения отсутствует из-за сильного поглощения озоном. Для ночных измерений более пригодна схема $3\text{ мкм}/313\text{ нм}/308\text{ нм}$ благодаря более высокой чувствительности. Эта схема также выглядит наиболее перспективной для продвижения в будущем в трудно доступную область высот $10 - 25\text{ км}$. Схема $3\text{ мкм}/347\text{ нм}/308\text{ нм}$ должна обеспечить минимально возможную концентрацию лазерно-индуцированного $ОН$ в зоне измерений.

Работа проводится при поддержке фонда РФФИ, проект N 095-05-14774.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Weinstock B., Niki H. Science, **176**, 290 (1972).
- [2] Wang C. C., Davis L. I., Wu C. H. et al., Science, **189**, 797 (1975).
- [3] Hard T. M., O'Brien J. O., and Cook T. B. J. Appl. Phys., **51**, 3459 (1980).
- [4] Heaps W. S., McGee T. J. J. Geophys. Res., **90**, 7913 (1985).
- [5] Stimpfle R. M., Lapson L. B., Wennberg P. O., and Anderson J. G. Geophys. Res. Lett., **16**, 1433 (1989).
- [6] Brune W. H., Stevens P. S., and Mather J. H. Proc. Conf. on Atm. Chem. (Nashville, Tennessee, Am. Meteorolog. Soc, Boston), p. 116 (1994).
- [7] Shirinzadeh B., Wang C. C., and Deng D. Q. Appl. Opt., **26**, 2102 (1987).

- [8] Bradshaw J. D., Rodgers M. D., and Davis D. D. Appl. Opt., **23**, 2134 (1984).
- [9] Dieke G. H., Crosswhite H. M. JQSRT, **2**, 97 (1962).
- [10] Copeland R. A., Jeffries J. B., and Crosley D. R. Chem. Phys. Lett., **138**, 425 (1987).
- [11] Wysong I. J., Jeffries J. B., and Crosley D. R. J. Chem. Phys., **92**, 5218 (1990).
- [12] Smith J. P. and Crosley D. R. J. Geoph. Res., **95**, 16427 (1990).
- [13] Справочник по лазерам. (ред. А. М. Прохоров, "Советское радио", Москва), с. 112 (1987).
- [14] Bertrand L., Monchalin J. P., and Corriveau R. Appl. Opt., **22**, 3148 (1983).

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 29 февраля 1996 г.