

03;07

Дистанционное лазерное зондирование углеводородов в атмосфере

© В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин

Балтийский государственный технический университет, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 18 мая 2001 г.

Выполнено численное решение лидарного уравнения для обратного комбинационного рассеяния молекулами некоторых углеводородов и определены оптимальные значения лазера на парах меди на расстояниях от 40 м до 4 км.

Лазерное зондирование молекул углеводородов в газовой фазе представляет интерес для мониторинга загрязнения атмосферы, контроля технологических газов и исследований в области атмосферной оптики [1]. Выполненные ранее в [2–4] оценки потенциальных возможностей лидара комбинационного рассеяния (КР) света для зондирования молекул водорода и иода в атмосфере с импульсными лазерами подтверждают вывод о перспективности лидаров КР для дистанционного измерения концентраций молекул в газовых смесях.

Целью настоящей работы является численное решение лидарного уравнения колебательного КР молекул этана, этилена и этилмеркаптана в направлении назад в условиях дневного зондирования. На основании такого моделирования сделан выбор длины волны лазерного излучения для получения максимальной мощности КР на фотоприемнике лидара. Сравнение результатов расчетов регистрируемой лидаром мощности КР и мощности солнечного фона позволили оценить минимально обнаружимые концентрации исследуемых молекул в условиях дневного зондирования.

Рассмотрен вариант использования лазера на парах меди на длинах волн 578.2, 510.6, 298.1, 255.3 нм и суммарной частоты 271.2 нм с пиковыми мощностями до 100 кВт [5]. Выбор молекул углеводородов определялся как строением молекул — у всех 2 атома углерода, так и данными об их предельно допустимых концентрациях (ПДК) для контроля загрязнения атмосферы. В [6] приведены следующие значения ПДК:

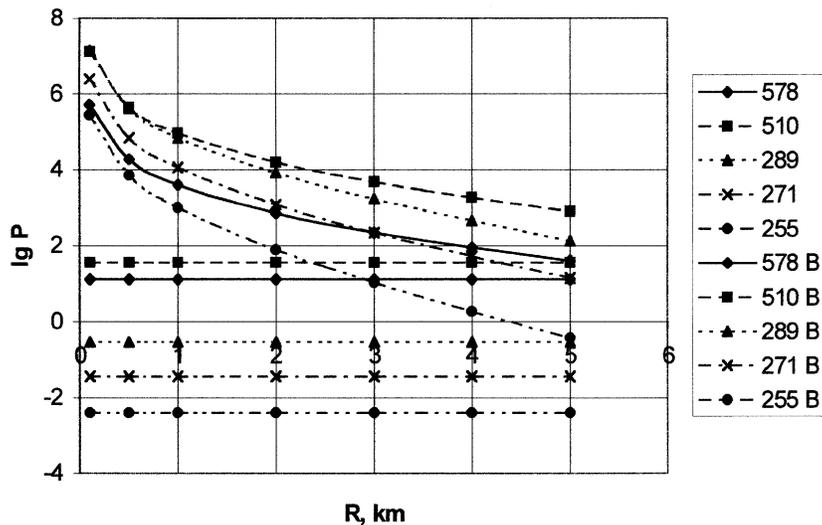


Рис. 1. Графики зависимости логарифма мощности КР для молекулы этилена с концентрацией 10^{19} см^{-3} от расстояния зондирования для выбранных длин волн медного лазера. Для сравнения приведен уровень минимально детектируемой лидаром мощности P_b для нашей экспериментальной ситуации.

для этана $50 \text{ mg/m}^3 - 1.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, этилена $3.0 \text{ mg/m}^3 - 6.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и этилмеркаптана $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ mg/m}^3 - 3.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Частоты собственных валентных СН колебаний исследуемых молекул взяты для C_2H_6 из [7], C_2H_4 из [1] и $\text{C}_2\text{H}_4\text{SH}$ из [8] и приведены в таблице. Для молекулы метилмеркаптана рассмотрено валентное СН колебание группы CH_3 2917 см^{-1} и валентное SH колебание 2751 см^{-1} , интенсивность которого в пять раз меньше по данным [8]. По этим значениям были рассчитаны длины волн полос КР исследуемых молекул $\lambda_{\text{КР}}$ для выбранных длин волн лазеров λ_0 , и их значения также приведены в таблице.

Дифференциальные сечения колебательного КР исследуемых молекул в направлении назад ($d\sigma/d\Omega$) для длин волн выбранных лазеров были определены, как и в [3], по экспериментально измеренным значениям сечений для длины волны излучения азотного лазера $\lambda_0 = 337.1 \text{ nm}$

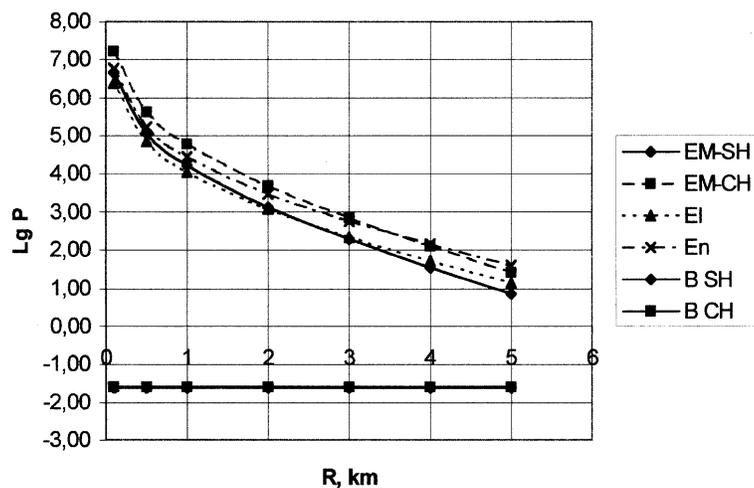


Рис. 2. График зависимости логарифма мощности КР для всех исследуемых молекул с концентрацией 10^{19} cm^{-3} для длин волн 255 nm от расстояния зондирования. Для сравнения приведен уровень минимально детектируемой лидаром мощности P_b для нашей экспериментальной ситуации на этой длине волны.

из [1] и представлены в таблице. Значение для этана оценено нами по известным сечениям для метана и бутана из [1], а сечение для этилмеркаптана оценено по значениям интенсивностей КР, приведенным в [8] с учетом данных [1].

Лидарное уравнение для КР рассмотрим в виде [2] с теми же значениями параметров из [2,3]. Численные расчеты мощности КР были выполнены для значений концентрации исследуемых молекул 10^{19} cm^{-3} и расстояний зондирования $R = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ и 6.0 km .

Как и в [3], для условий дневного зондирования были получены значения фоновой мощности на фотоприемнике $P_b(\lambda, R)$ и минимально детектируемой лидаром мощности P_m по значениям спектральной яркости солнечного излучения для длин волн полос КР исследуемых молекул $S_b(\lambda)$, приведенным в таблице.

Результаты расчетов для молекулы C_2H_4 приведены на рис. 1 в качестве примера. На этом же рисунке представлен уровень минимально

Значения частот собственных валентных СН колебаний исследуемых молекул, длин волн излучения медного лазера, длин волн полос КР и дифференциальных сечений КР исследуемых молекул, относительных величин спектральной чувствительности фотокатодов ФЭУ, коэффициента ослабления и спектральной яркости солнечного излучения для всех длин волн

Ethane-C ₂ H ₆			$\nu = 3070 \text{ cm}^{-1}$			
$\lambda_0, \text{ nm}$	$\lambda_R, \text{ nm}$	$(d\sigma/d\Omega) \times 10^{30}, \text{ cm}^2/\text{str}$	$k, \text{ km}^{-1}$	$\xi_p(\lambda)$	$S_b, 10^6, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{nm})$	$k_0, \text{ km}^{-1}$
578.2	697.3	5.4	0.15	0.16	5.2	0.16
510.6	601.3	8.9	0.16	0.53	15.3	0.17
289.1	316.1	86.8	0.38	0.35	7.23	0.53
271.2	294.8	112.1	0.53	0.29	0.05	0.70
255.3	276.1	142.7	0.58	0.15	0.03	1.91
337.1	374.3	47.0				
Ethylene-C ₂ H ₄			$\nu = 3020 \text{ cm}^{-1}$			
$\lambda_0, \text{ nm}$	$\lambda_R, \text{ nm}$	$(d\sigma/d\Omega) \times 10^{30}, \text{ cm}^2/\text{str}$	$k, \text{ km}^{-1}$	$\xi_p(\lambda)$	$S_b, 10^6, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{nm})$	
578.2	694.0	9.4	0.15	0.18	5.56	
510.6	598.8	15.5	0.16	0.53	15.48	
289.1	315.4	151.0	0.39	0.35	7.17	
271.2	294.2	195.0	0.54	0.29	0.05	
255.3	275.6	248.4	0.59	0.15	0.03	
337.1	373.3	81.8				
Ethylmercaptane-C ₂ H ₄ SH			$\nu \text{ CH} = 2931 \text{ cm}^{-1}$			
$\lambda_0, \text{ nm}$	$\lambda_R, \text{ nm}$	$(d\sigma/d\Omega) \times 10^{30}, \text{ cm}^2/\text{str}$	$k, \text{ km}^{-1}$	$\xi_p(\lambda)$	$S_b, 10^6, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{nm})$	
578.2	694.2	10.8	0.15	0.18	5.56	
510.6	599.0	17.7	0.16	0.53	15.46	
289.1	315.5	172.6	0.39	0.35	7.18	
271.2	294.3	222.9	0.54	0.29	0.05	
255.3	275.6	283.9	0.59	0.15	0.03	
337.1	373.4	93.5				
Ethylmercaptane-C ₂ H ₄ SH			$\nu \text{ SH} = 2570 \text{ cm}^{-1}$			
$\lambda_0, \text{ nm}$	$\lambda_R, \text{ nm}$	$(d\sigma/d\Omega) \times 10^{30}, \text{ cm}^2/\text{str}$	$k, \text{ km}^{-1}$	$\xi_p(\lambda)$	$S_b, 10^6, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{nm})$	
578.2	694.0	14.3	0.15	0.18	5.56	
510.6	598.8	23.5	0.16	0.53	15.48	
289.1	315.4	229.0	0.39	0.35	7.17	
271.2	294.2	295.7	0.54	0.29	0.05	
255.3	275.6	376.5	0.59	0.15	0.03	
337.1	373.3	124.0				

детектируемой лидаром мощности P_b для нашей экспериментальной ситуации, рассчитанный для каждой длины волны [4]. Причем превышение мощности КР над фоновой получено лишь для длины волны 255 nm для всего диапазона расстояний и концентрации 10^{19} cm^{-3} .

На рис. 2 приведены результаты расчетов для всех в исследуемых молекул с концентрацией 10^{19} cm^{-3} и длины волны 255 nm и тех же расстояний зондирования. Анализ этих результатов показывает, что на всех расстояниях максимальную мощность можно получить на длине волны 255 nm для полосы СН этилмеркаптана, несколько ниже для полосы SH и этана и еще ниже для этилена. Причем для всех молекул получено превышение над фоном, который на этой длине выше для полосы СН этилмеркаптана и этана. Используя данные о ПДК, можно оценить максимальные расстояния, на который можно обнаружить исследуемые молекулы с концентрациями на уровне ПДК. Наилучший результат для этана и этилена дают длины волн 289 и 271 nm — 4 и 1.5 km соответственно, а для этилмеркаптана на длине волны 271 nm 40 m для полосы СН и 30 m — для SH.

Таким образом, оптимальным является использование в такой лидарной системе излучения медного лазера с длиной волны 271.2 nm для обнаружения исследуемых молекул с концентрациями на уровне ПДК.

Список литературы

- [1] *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
- [2] *Привалов В.Е., Шеманин В.Г.* // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82. № 4. С. 700–702.
- [3] *Privalov V.E., Shemanin V.G.* // Proceedings of SPIE. 1998. N 3345. P. 6–10.
- [4] *Привалов В.Е., Шеманин В.Г.* // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 2–3. С. 237–239.
- [5] *Вицинский С.А., Дивин В.Д., Келлер А.В.* и др. // Оптический журнал. 1996. № 5. С. 83–88.
- [6] *Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух.* С.-Петербург: НИИ Охраны атмосферного воздуха, 1992. 130 с.
- [7] *Murphy W.F., Holzer W., Bernstein H.J.* // Appl. Spectroscopy. 1969. V. 23. N 3. P. 211–218.
- [8] *Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П.* Колебательные спектры многоатомных молекул. М.: Наука, 1970. 560 с.