

ЗОНДИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛ ЙОДА САМОЛЕТНЫМ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ ЛИДАРОМ

В.Привалов, В.Шеманин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет vaevpriv@yandex.ru

Обнаружение радиоактивных изотопов молекул йода в атмосфере над атомными электростанциями или радиохимическими предприятиями может служить индикатором радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха. Поэтому разработка самолетного флуоресцентного лидара для обнаружения низких концентраций молекул йода – перспективный метод мониторинга радиоактивного загрязнения атмосферы над такими объектами.

Целью данной работы является теоретическая оценка потенциальных возможностей такого самолетного флуоресцентного лидара для детектирования выбросов молекул йода в приземном слое атмосферы на уровне концентраций порядка 10^{10} см^{-3} что эквивалентно объемной доле около 1 млн^{-1} в смеси [1], и выше. Выполненные в работе [2] лидарные флуоресцентные исследования позволили измерить дифференциальное сечение флуоресценции на длине волны лазерного излучения 532 нм.

На этой базе разработан самолетный вариант флуоресцентного лидара, оптическая схема которого приведена на рис.1. Импульс YAG:Nd-лазера 1 длительностью 10 нс и энергией 10 мДж на длине волны 532 нм направлялся по оси приемного телескопа типа Ньютона со сферическим зеркалом 4 диаметром 0,4 м с самолета вертикально вниз. Рассеянное назад излучение флуоресценции с расстояния до 3 км через интерференционный светофильтр 6 с максимумом пропускания на длине 589 нм полушириной 50 нм попадало на фотокатод ФЭУ-79 5. Импульс напряжения с ФЭУ 5 подавался на вход специальной микропроцессорной измерительной системы [3] и позволял на экране ПК получать графики зависимости интенсивности флуоресценции от расстояния зондирования. Стеклопластиковая пластина 10 направляла часть лазерного излучения через светофильтр 2 на фотодиод 3 для синхронизации работы лидара и контроля энергии лазерного импульса. Для оценки эффективности детектирования флуоресценции молекул йода с таким уровнем концентрации на расстояниях зондирования до 3 км от приемной системы лидара в такой экспериментальной реализации было выполнено компьютерное моделирование лидарного уравнения для флуоресценции в режиме счета фотонов для вертикального зондирования молекул I_2 в приземном слое атмосферы [4, 5] с самолета.

Лидарное уравнение для флуоресценции в режиме счета фотонов в направлении назад рассмотрим, как и в работе [6], в виде

$$N(\lambda, H) = N_0 \cdot K_1 \cdot \Delta H \cdot A_0 \cdot T_0(\lambda_0, H) \cdot T(\lambda, H) \cdot N_A \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \xi(\lambda) f t / H^2, \quad (1)$$

где $N(\lambda, H)$ – число зарегистрированных фотонов на фотоприемнике на длине волны флуоресценции λ

с высоты H , а H – высота над поверхностью Земли;

ΔH – шаг по высоте; $N_0 = \frac{E_L \cdot \lambda_0}{h \cdot c}$ – число фотонов

в импульсе лазерного излучения; E_L – энергия импульса лазерного излучения; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны лазерного излучения; t – время измерения; f – частота повторения лазерных импульсов; K_1 – постоянная лидара; A_0 – площадь приемного телескопа; $T_0(\lambda_0, H)$, $T(\lambda, H)$ – пропускание атмосферы на длинах волн лазерного из-

лучения и флуоресценции соответственно; N_A – концен-

трация молекул; $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$ – дифференциальное сечение флуоресценции исследуемыми молекулами на

длине волны лазерного излучения; $\xi(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотокатода фотоприемника на длине волны λ максимума полосы флуоресценции исследуемых молекул.

Из лидарного уравнения (1) получим уравнение для времени измерения [6] в виде:

$$t = N(\lambda, H) H^2 / N_0 \cdot K_1 \cdot \Delta H \cdot A_0 \cdot T_0(\lambda_0, H) \cdot T(\lambda, H) \cdot N_A \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \xi(\lambda) f. \quad (2)$$

Значение времени измерения определяется параметрами лидара, параметрами молекул йода и значением пропускания слоя атмосферы. Лазерное излучение второй, третьей и четвертой гармоник YAG:Nd лазера с длинами волн 532, 355 и 266 нм с частотой следования лазерных импульсов 100 кГц длительностью 10 нс и импульсной энергией 10 мДж было выбрано для моделирования. Значения эффектив-

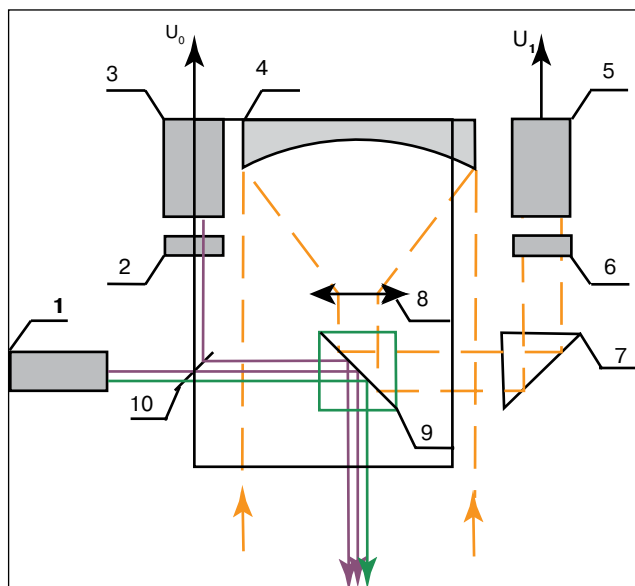


Рис. 1. Оптическая схема флуоресцентного лидара: 1 – лазер; 2 и 6 – интерференционные фильтры; 3 – фотодиод; 4 – сферическое зеркало; 5 – ФЭУ; 7 и 9 – призмы; 8 – линза; 10 – стеклянная пластина

ной площади приемного телескопа лидара было взято $0,1256 \text{ м}^2$ (сферическое зеркало диаметром $0,4 \text{ м}$ в [3]) в этом лидарном эксперименте. Дифференциальное сечение флуоресценции исследуемых молекул на длине волны лазерного излучения $(\frac{d\sigma}{d\Omega})$ было

измерено в экспериментах в [2] и равно $4,2 \cdot 10^{-22} \text{ см}^{-3}$ в хорошем согласии с данными [7]. Длина волны полосы флуоресценции молекул йода $589,5 \text{ нм}$ и время затухания около 1000 нс взято из [7, 8]. Поэтому время измерения было принято 1000 нс , и ему соответствует пространственное разрешение вдоль расстояния зондирования 200 м . Постоянная лидара K_1 равна $0,495$ на длине волны 532 нм по данным наших измерений в [3].

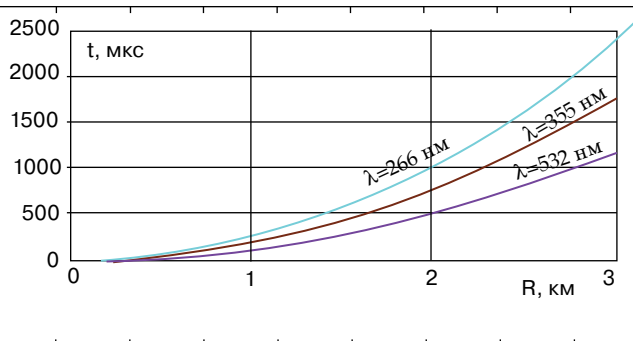


Рис. 2. Зависимость времени измерения t от расстояния зондирования R для разных длин волн лазерного излучения, частоты следования лазерных импульсов 100 кГц и 10 мДж импульсной энергии и концентрации молекул йода 10^{10} см^{-3}

Значение спектральной чувствительности фотокатодов ФЭУ $\xi(\lambda)$ для длины волны полосы флуоресценции молекул йода равно $0,54$ для нашего экспериментального лидара [9]. Пропускание

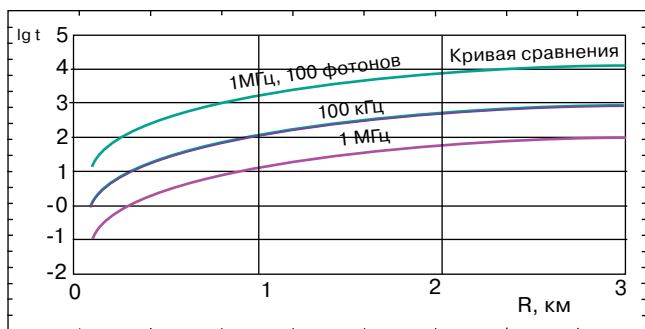


Рис. 3. Зависимость логарифма времени измерения $\lg t$ от расстояния зондирования R для $\lambda = 532$ нм лазерного излучения, разных частот следования лазерных импульсов и 10 мДж импульсной энергии, концентрация молекул йода 10^{16} см $^{-3}$

атмосферы рассчитывалось, как и ранее в [4], по формуле

$$T(\lambda, N) = \exp\left[-\int_0^R k(\lambda) dH\right] \quad (3)$$

по значениям коэффициента ослабления k из [9] (см. таблицу). Изменение коэффициента ослабления лазерного излучения атмосферой с высотой H для выбранных длин волн лазерного излучения и максимума полосы флуоресценции было учтено в соответствии с графиком рисунка 19.4 в [9, с. 382].

Используя приведенные выше данные, было выполнено численное решение уравнения (3) для флуоресценции исследуемых молекул йода с концентрацией на уровне порядка $N_A = 10^{10}$ см $^{-3}$ в диапазоне расстояний зондирования 0,1 – 2 км для наших экспериментальных условий и возможности зарегистрировать 1 флуоресцентный фотон. Результаты расчетов времени измерения для выбранного диапазона высот и всех длин волн излучения гармоник YAG:Nd-лазера представлены на рис. 2.

Как следует из графиков рис.2, наименьшее время измерения получается для длины волны 532 нм. При зондировании с высоты 2 км на этой длине волны время измерения составило 0,5 мс, на длине волны 355 нм – 0,79 мс, а на длине волны 266 нм оно возросло до 1,06 с, что является максимальным для нашей экспериментальной задачи. Результаты расчетов на графиках рис.3 подтверждают, что увеличение частоты следования лазерных импульсов с 100 кГц до 1 МГц ведет к пропорциональному увеличению времени измерения на порядок. Интересный для практики вариант регистрации 100 флуоресцентных фотонов при возбуждении излучением на длине волны 532 нм с частотой следования импульсов 1 МГц ведет к увеличению времени измерения с 0,12 мс до 11,87 мс для высоты 2 км.

Движение самолета с лидаром приведет к небольшому искажению результатов зондирования. Если самолет имеет скорость порядка 500 км/ч, или примерно 140 м/с, то точка наблюдения на поверхности Земли будет размываться. Поле зрения приемного телескопа при расходимости порядка 10^{-3} с высоты 2 км на поверхности Земли будет иметь форму круга диаметром 2 м. Поэтому для наименьшего времени измерения на длине волны 532 нм и высоте 2 км, равного 0,5 мс, длина измерительного объема

Значения параметров модели

Длина волны λ , нм	Коэффициент ослабления $k(\lambda, R)$, км $^{-1}$	Дифференциальное сечение флуоресценции $\frac{d\sigma(\lambda_L)}{d\Omega} 10^{30}$, см 2 /ср
266	0,785	2,576
355	0,310	0,812
532	0,160	0,161

составит 2,07 м и при толщине слоя атмосферы 200 м этот измерительный объем будет равен 650 м 3 , а не 628 м 3 , как для неподвижного лидара.

Анализ этих результатов показывает, что для данной концентрации N_A и энергии флуоресценции, равной энергии 1 фотона, оптимальным вариантом для самолетного зондирования молекул йода с высоты 2 км и менее является лазерное излучение с длиной волны $\lambda_0 = 532$ нм. При этом время измерения при использовании этой длины волны для диапазона высот 0,1 – 3 км составит от 1,32 мкс до 1,19 мс. Таким образом, результаты моделирования показывают возможность построения флуоресцентного лидара для зондирования с самолета молекул радиоактивного изотопа йода в приземном слое атмосферы с концентрациями на уровне 10^{10} см $^{-3}$ и выше в режиме счета отдельных фотонов на расстояниях зондирования до 3 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронина Э., Привалов В., Фотиади А., Шеманин В. Лазерные приборы для контроля радиоактивного загрязнения воздуха. – Новороссийск: НПИ, 2009.
2. Воронина Э., Привалов В., Шеманин В. Лидарное зондирование молекул йода при низких давлениях. – Оптика и спектроскопия, 2002, т.93. № 4.
3. Воронина Э., Привалов В., Шеманин В. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР. – Письма в ЖТФ, 2004, т. 30, вып.5.
4. Воронина Э., Шеманин В. Зондирование молекул загрязняющих веществ в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния в режиме счета фотонов. – Труды конференции «Лазеры. Измерения. Информация», С.-Пб, 2001.
5. Privalov V., Shemanin V. Molecular iodine laser monitoring in the atmosphere. – Proc. SPIE, 2000, v.4316.
6. Voronina E., Privalov V., Shemanin V. The Iodine Molecules in the Near-Earth Atmospheric Layer Fluorescence Lidar Sensing from Space Orbit. – Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2009, v. 18, № 3.
7. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987.
8. Privalov V., Shemanin V. Lidar measurements of iodine molecule concentration. – Proc. SPIE, 2002, v. 4900.
9. Справочник по лазерам./Под ред. Прохорова А.М. т.I и II. М.: Советское радио, 1978.