

Результаты испытаний мобильного сканирующего флуоресцентно-аэрозольного лидара

М.М. Макогон*

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

Поступила в редакцию 18.12.2010 г.

Приведены результаты испытаний мобильного гибридного флуоресцентно-аэрозольного лидара, предназначенного для оперативного обнаружения в атмосфере аэрозолей и выделения среди них аэрозолей биогенного происхождения. Зондирование аэрозоля ведется на длине волны 1064 нм, зондирование аэрозоля биогенного происхождения — на длине волны 266 нм.

Ключевые слова: биоаэрозоль, флуоресценция, лидар, испытания, триптофан; bioaerosol, fluorescence, lidar, testing, tryptophane.

Обнаружение патогенных бактерий в воздухе является одним из направлений борьбы с терроризмом (биотерроризмом). Для защиты населения, для противодействия расширению эпидемиологических очагов и в целях профилактики необходимы эффективные детекторы опасных аэрозольных примесей в окружающем пространстве.

Поскольку размер искусственных частиц лежит в диапазоне 1–10 мкм, то их обнаружение может эффективно вестись оптическими средствами. Наиболее подходящим средством дистанционного контроля являются лидары, обеспечивающие оперативное 3D-картирование аэрозольных неоднородностей в приземной атмосфере на расстоянии до нескольких десятков километров.

В статье приведены результаты испытаний мобильного гибридного флуоресцентно-аэрозольного лидара, предназначенного для оперативного обнаружения в атмосфере аэрозолей и выделения среди них аэрозолей биогенного происхождения. Лидар был изготовлен, испытан и введен в опытную эксплуатацию в 2008 г. Конструкция лидара детально описана в [1, 2]. Лидар обеспечивает проведение наблюдений во всей верхней полусфере. В лидаре реализована схема одновременного наблюдения сигналов упругого рассеяния и флуоресценции при облучении среды на лазерных длинах волн 1064 и 266 нм соответственно, причем в ИК-канале сигнал формируется аэрозолями любой природы, а в УФ-канале — аэрозолями только биогенного происхождения. Маркером служит триптофан, флуоресцирующий в полосе 300–400 нм с центром на 350 нм. В состав лидарного комплекса входит также аэрозольная камера, предназначенная для оперативного контроля работоспособности лидара.

Испытания лидара в целом проводились в полевых условиях [3, 4], отдельных компонентов лидара — в лабораторных условиях.

Цель лабораторных испытаний состояла в проверке работоспособности аэрозольной камеры по измерениям флуоресценции аэрозоля, приготовленного из водного раствора триптофана. Аэрозоль создавался ингалятором «Вулкан-2», средний диаметр генерируемых частиц в соответствии с технической документацией составлял 5 мкм. Стационарность заполнения камеры аэрозолем обеспечивалась ее продувкой слабым потоком азота, подаваемого в ингалятор и выходящего из камеры через специальный штуцер. Испытания проводились на установке, аналогичной [5].

Концентрация аэрозоля C в камере оценивалась по измерению пропускания I/I_0 аэрозолем излучения He–Ne-лазера $C = -\ln(I/I_0)/(kl)$ (здесь $k = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2$ — коэффициент ослабления [6], $l = 120 \text{ см}$ — длина камеры) и составляла $1200\text{--}1400 \text{ см}^{-3}$.

Измерялись спектр комбинационного рассеяния азота атмосферного воздуха, спектр флуоресценции воздуха в помещении, спектр флуоресценции аэрозоля, приготовленного в камере из дистиллированной воды, и спектр флуоресценции аэрозоля из 0,1%-го раствора триптофана в дистиллированной воде. Сигнал КР и флуоресценции воздуха формировался на участке трассы длиной 7,5 м, соответствующем времени интегрирования используемого счетчика импульсов ФЭУ (50 нс), сигнал флуоресценции аэрозоля — только в камере. Для подавления сигнала рассеяния на длине волны 266 нм перед монохроматором устанавливалась кювета с бензолом. Запись спектра осуществлялась при ширине щели 1 мм (разрешение 2,4 нм). Число лазерных импульсов, по которым накапливался сигнал, выби-

* Михаил Мордухович Макогон (mmm@asd.iao.ru).

ралось таким, чтобы погрешность измерений составляла 2–3%. В ходе записи фиксировалось среднее значение энергии лазерного излучения.

Для интервалов счета, в которых был сосредоточен сигнал, определялась интегральная по длинам волн интенсивность излучения КР и флуоресценции. Затем эти значения приводились к единой шкале путем нормировки на среднее значение энергии импульсов лазерного излучения и число импульсов накопления. Количественные результаты сведены в табл. 1.

их концентрация — $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, поэтому расчетная величина сигнала КР равна $5,2 \cdot 10^{13}$. Отношение расчетных значений сигналов флуоресценции аэрозоля и КР азота составляет 14,7, а экспериментально измеренных — 12,95. Учитывая неопределенность многих параметров, согласие можно считать весьма хорошим.

Таким образом, лабораторные испытания продемонстрировали корректность работы аппаратуры, правильность методики обработки данных и достоверность получаемых результатов.

Таблица 1

Результаты измерений

Объект	Энергия, мДж	Число накопленных лазерных импульсов	Интегральная интенсивность, число отсчетов	Нормированная интегральная интенсивность
КР азота	75	70000	479	0,0000912
Флуоресценция воздуха	65	13900	64	0,0000708
Флуоресценция аэрозоля из раствора триптофана	70	6000	6204	0,0148
Флуоресценция водяного аэрозоля	80	12000	343	0,000357

Из приведенных данных следует, что нормированная интегральная интенсивность флуоресценции аэрозоля, приготовленного из 0,1%-го раствора триптофана в воде, превосходит флуоресценцию воздуха, водяного аэрозоля и КР азота в 209, 41 и 162 раза соответственно.

Сопоставим полученные результаты с известными данными. Число фотоотсчетов N , регистрируемых лидаром за время измерений, пропорционально отношению полной энергии лазерных импульсов E к энергии принимаемых фотонов $h\nu$, квантовому выходу фотокатода ФЭУ η , концентрации C излучающих частиц, сечению $d\sigma/d\Omega$ флуоресценции (комбинационного рассеяния) этих частиц и длине участка l , с которого собирается излучение:

$$N \propto (E/h\nu)\eta Cl d\sigma/d\Omega. \quad (1)$$

Квантовые выходы фотокатода ФЭУ-106 при измерении КР и флуоресценции сильно различаются, так как диапазон 250–350 нм приходится на спад кривой чувствительности. Спектральная зависимость квантового выхода приведена в [7] и у мультищелочного фотокатода $\text{Na}_2\text{KSb}-\text{Cs}$ используемого ФЭУ $\eta = 0,06$ для 283 нм и 0,23 для 350 нм.

Сечение флуоресценции молекулы триптофана в максимуме составляет $2,75 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2/(\text{ср} \cdot \text{нм})$ [8], ширина полосы флуоресценции — 55 нм [9], таким образом интегральное сечение будет равно $1,51 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{ср}$. Количество жидкости в 1 см^3 аэрозоля при средней концентрации частиц 1300 см^{-3} составляет $8,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3$. В этом объеме жидкости содержится $2,5 \cdot 10^{11}$ молекул триптофана. Исходя из этих данных, средней энергии и числа накопленных импульсов, рассчитанное по (1) значение сигнала флуоресценции равно $7,64 \cdot 10^{14}$.

Сечение КР молекул азота при возбуждении на длине волны 266 нм составляет $7,73 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$,

Полевые испытания проводились в 4 этапа. На первом этапе тестировалась сканирующая система лидара, контрольным инструментом служил теодолит FDT2GCA (Китай), установленный на крыше кабины лидара. При проведении испытаний лидар и теодолит последовательно наводились на контрастные объекты на местности и определялись направления на них. Затем вычислялись горизонтальные углы между направлениями на объекты, определенные лидаром и теодолитом, и вычислялась среднеквадратическая погрешность разностей этих углов, которая для одного измерения составила $9,25'$. Измеряемыми показателями при определении погрешности наведения сканирующей системы относительно вертикальной оси автомобиля являлись направления на участки объекта, подсвечиваемые лазерным излучением. Среднеквадратическая погрешность одного измерения составила $2'$.

На втором этапе оценивалась дальность действия аэрозольного канала. Для этого проводилось наклонное зондирование кучевых облаков и вертикальное зондирование безоблачного неба. Дальность зондирования облаков при накоплении сигнала в течение 10 с составила около 31 км при отношении сигнал-шум более 60 [4]. Отсюда следует, что дальность действия лидара по искусственным аэрозольным образованиям с плотностью частиц 100 шт./см^3 (типичная плотность частиц в кучевом облаке) превысит 100 км. Потолок зондирования безоблачного неба в светлое время суток — не менее 17 км, при этом отчетливо регистрируется временное поведение тонкой структуры атмосферных аэрозольных образований [4].

На третьем этапе испытаний проводилась аттестация флуоресцентного канала путем регистрации флуоресценции аэрозоля, получаемого в камере из растворов триптофана разной концентрации, расстояние между лидаром и камерой составляло 500 м. Для измерения концентрации аэрозоля

использовался счетчик аэрозольных частиц Grimm 1.108 (Германия). Измерялись амплитуда лидарного сигнала ультрафиолетового канала, концентрация и распределение аэрозольных частиц по размерам в выходящем из камеры потоке азота. Сигнал флуоресценции накапливался и усреднялся в течение 1 с, данные счетчика — в течение 1 мин. Результаты измерений приведены на рис. 1.

Видно, что пороговая чувствительность лидара на этой дальности составляет 3000–5000 частиц в 1 л воздуха при 0,1%-й концентрации раствора триптофана, что соответствует регистрируемому сигналу 30 мВ.

При проведении натурных измерений необходимо учитывать влияние атмосферы. Традиционно считается, что ослабление излучения в ближней УФ-области спектра происходит за счет аэрозольного и молекулярного рассеяния, а поглощение водяного пара отсутствует. Однако в [10] показано, что коэффициент поглощения водяного пара на длине волны 266 нм составляет $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$ ($\approx 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1} \cdot (\text{г}/\text{м}^3)$). Поэтому фиксировались метеорологическая дальность видимости (МДВ), температура T и относительная влажность воздуха e . При работе с аэрозольной камерой МДВ была равна 27,5 км, $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $e = 50\%$. В этих условиях пропускание атмосферы около 55%.

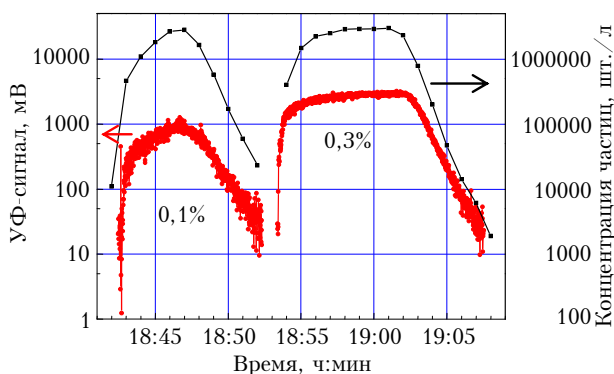


Рис. 1. Временная зависимость сигнала УФ-канала от аэрозоля в камере и концентрации частиц аэрозоля диаметром больше 1 мкм. Указана концентрация раствора

Оценим пороговую чувствительность лидара при регистрации бактерий. Для этого приравняем произведение концентрации триптофана на его сечение флуоресценции к аналогичному произведению для бактерий. Количество жидкости в 1 см^3 аэрозоля, рассчитанное по регистрируемому счетчиком распределению частиц по размерам, составляет в максимуме (рис. 1) $4,39 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3$, а для порогового сигнала — $9,78 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3$. В этих объемах жидкости содержится $1,29 \cdot 10^{10}$ и $2,87 \cdot 10^7$ молекул триптофана, произведение концентрации молекул триптофана на сечение флуоресценции ($1,51 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{ср}$) составляет $1,9 \cdot 10^{-9}$ и $4,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ соответственно.

Сечения флуоресценции спор ряда бактерий, проинтегрированные в полосу шириной 70 нм с центром 350 нм при возбуждении излучением 266 нм,

приведены в [11]. За среднее значение сечений можно взять $10^{-11} \text{ см}^2/\text{ср}$. Тогда расчетные концентрации спор бактерий составят 190 (для максимального сигнала) и 0,43 (на пороге чувствительности) частицы в 1 см^3 при накоплении сигнала в течение 1 с.

На последнем этапе испытаний проводилось зондирование искусственных аэрозольных образований в атмосфере. Они создавались путем распыления водных растворов триптофана и лизина (концентрация аминокислот составляла 0,3%) и суспензии кишечной палочки *Escherichia coli* (*E. coli*) модификации PETRRB в туннеле шириной 6,5, высотой 7 и длиной 50 м. В качестве генераторов аэрозоля использовалось 15 распылителей типа PRO ULV 1035 (США). Измерялись величины сигналов в ИК- и УФ-каналах. Накопление сигналов в этих измерениях велось в течение 10 с.

Связь сигнала аэрозольного (ИК) канала с расходом жидкости в распылителях изучалась на дальности 4000 м. Так как сигнал лидара был слишком большим, для его снижения на приемный телескоп устанавливалась крышка с отверстиями, ослабляющая принимаемое излучение в 20 раз (коэффициент ослабления предварительно измерялся при зондировании нижнего слоя атмосферы). Из полученных значений сигнала ИК-канала лидара находились их средние значения и среднеквадратические отклонения, результаты представлены на рис. 2. МДВ во время проведения измерений была 27–31 км, $T = 9,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $e = 50\%$. При этих условиях полное пропускание атмосферы составляло примерно 80%.

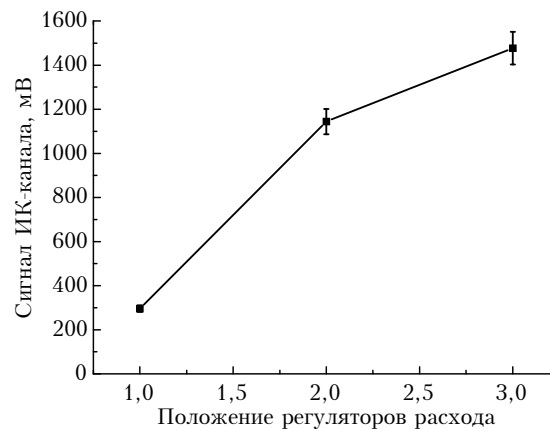


Рис. 2. Зависимость сигнала ИК-канала от положения регуляторов

Связь сигнала флуоресцентного (УФ) канала с расходом растворов трех разных веществ в распылителях изучалась при разных дальностях. Результаты измерений приведены на рис. 3.

Метеорологические условия, при которых проводились испытания, рассчитанное по ним пропускание атмосферы представлены в табл. 2. Из этих данных следует, что, возможно, флуоресценцию аэрозоля из раствора лизина лидар просто «не видел».

Пример регистрируемого лидаром пространственно-временного распределения флуоресцирующих аэрозолей приведен в [12]. Лидар был расположен

на расстоянии 570 м от туннеля, и сигнал с этой дистанции наиболее сильный. Под действием ветра аэрозоль выносился из туннеля и, постепенно рассеиваясь, удалялся от лидара, но тем не менее прослеживался лидаром до дальности 750 м.

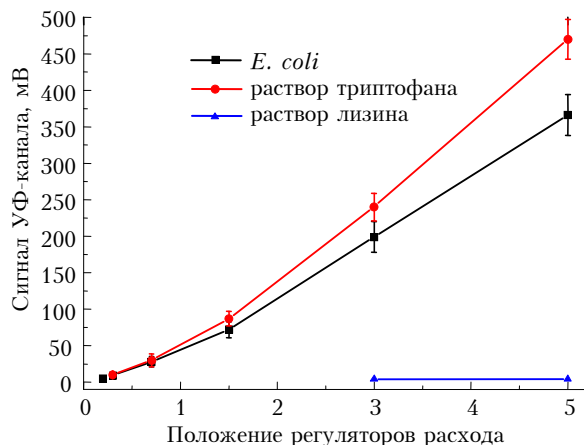


Рис. 3. Зависимость сигнала УФ-канала от положения регуляторов. Дальность зондирования 570 м (*E. coli*), 2000 м (раствор триптофана) и 1500 м (раствор лизина)

Таблица 2

Метеоусловия при испытаниях					
Объект	Дальность, м	МДВ, км	T , °C	e , %	Пропускание, %
Триптофан	2000	13	13,1	54	3,5
<i>E. coli</i>	500	30	9,5	50	55
Лизин	1500	6	4,0	80	< 0,6

Таким образом, испытания лидара показали, что дальность действия аэрозольного канала ИК-диапазона при обнаружении аэрозоля составляет не менее 30 км, дальность действия флуоресцентного канала УФ-диапазона при обнаружении аэрозоля биогенного происхождения не менее 2 км при пороговой чувствительности 10 спор в 1 см³.

В аттестации аэрозольной камеры принимали участие А.М. Кабанов, В.А. Погодаев и В.Б. Суханов, в проведении натурных испытаний — Г.С. Байрашин, Г.П. Коханенко, А.Н. Куряк и М.М. Новоселов, которым автор выражает искреннюю благодарность.

М.М. Makogon. Results of tests of the mobile scanning fluorescence-aerosol lidar.

The results of tests of the mobile hybrid fluorescence-aerosol lidar, intended for operative detection aerosols in the atmosphere and allocation among them the biogenic aerosols are given. The aerosols sounding is conducted at a wavelength of 1064 nm, the biogenic aerosols sounding — at a wavelength of 266 nm.

1. Коханенко Г.П., Макогон М.М. Мобильный сканирующий флуоресцентно-аэрозольный лидар «ФАРАН-М1» // Фотоника. 2010. № 4. С. 50–53.
2. Балин Ю.С., Клишкин А.В., Коханенко Г.П., Куряк А.Н., Макогон М.М., Новоселов М.М., Пономарев Ю.Н., Рышков О.А., Симонова Г.В. Мобильный сканирующий УФ флуоресцентно-аэрозольный лидар «ФАРАН-М1» // ЛАЗЕР ИНФОРМ. Вып. № 14–15 (438–439), август 2010. С. 4–7.
3. Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Куряк А.Н., Макогон М.М., Новоселов М.М., Пономарев Ю.Н., Рышков О.А., Симонова Г.В. Мобильный аэрозольно-флуоресцентный лидар // XVI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 12–15 октября, 2009. С. 496–499.
4. Balin Yu.S., Klimkin A.V., Kokhanenko G.P., Kurjak A.N., Makogon M.M., Novoselov M.M., Ponomarev Yu.N., Rynkov O.A., Simonova G.V. Mobile Scanning UV Aerosol-Fluorescent Lidar // Proc. 25th Int. Laser Radar Conference. 5–9 July 2010. St-Petersburg. V. 1. P. 155–158.
5. Кочанов В.П., Куряк А.Н., Макогон М.М., Тырышкин И.С. Спонтанное и обратное вынужденное комбинационное рассеяние в метане // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 101, № 2. С. 195–203.
6. Зельманович И.Л., Шифрин К.С. Таблицы по светорассеянию: коэффициенты ослабления, рассеяния и лучевого давления. Т. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 435 с.
7. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М.: Изд-во Московского ун-та, 1986. 344 с.
8. Hug W.F., Bhartia R., Taspin A., Lane A., Conrad P., Sijapati K., Reid R.D. Status of Miniature Integrated UV Resonance Fluorescence and Raman Sensors for Detection and Identification of Biochemical Warfare Agents // Proc. SPIE. 2005. V. 5994. 59940J.
9. Hill S.C., Pinnick R.G., Niles S., Pan Y.L., Holler S., Chang R.K., Bottiger J., Chen B.T., Orr C.S., Feather G. Real-time measurement of fluorescence spectra from single airborne biological particles // Field Anal. Chem. Technol. 1999. V. 3, N 4–5. P. 221–239.
10. Макогон М.М. Спектральные характеристики водяного пара в УФ-области спектра // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 9. С. 764–775.
11. Sivaprakasam V., Huston A.L., Scotto C., Eversole J.D. Multiple UV wavelength excitation and fluorescence of bio-aerosols // Opt. Express. 2004. V. 12, N 19. P. 4457–4466.
12. Макогон М.М. Сравнительный анализ спектроскопических методов дистанционной диагностики биоаэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 350–358.