

УДК 528.813

Использование длинноволнового диапазона для дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля

А.В. Климкин¹, А.А. Карапузиков², Г.П. Коханенко¹, А.Н. Куряк¹,
К.Ю. Осипов¹, Ю.Н. Пономарев¹, Шо Чжан^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²ООО «Специальные технологии»

630060, г. Новосибирск, ул. Зеленая Горка, 1/3

Поступила в редакцию 27.01.2020 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментов по регистрации сигналов обратнорассеянного излучения ИК-лазера от аэрозольных частиц, содержащих органические примеси. Исследования выполнены на лабораторном стенде по схеме лидарного зондирования на контролируемой оптической трассе. В качестве модельных сред использовались водный аэрозоль и водные растворы, содержащие органические примеси: триптофан, изопропиловый спирт, глицерин, никотинамидадениндинуклеотид. Результаты измерений сигналов обратного рассеяния для различных органических примесей в исследуемых аэрозольных частицах показывают возможность использования ИК-лазеров со сканированием частоты излучения для дистанционного зондирования атмосферного органического аэрозоля.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, CO₂-лазер, длинноволновый лидар, дистанционное зондирование; laboratory simulation, CO₂ laser, long-wave lidar, remote sensing.

Введение

Контроль и мониторинг атмосферного аэрозоля, содержащего органические соединения природного и антропогенного происхождения, важен для оценки его опасности для человека, растительных и животных биосистем. Масштабы и динамика аэрозольных полей в атмосфере обуславливают развитие быстрых методов дистанционного оптического зондирования атмосферного аэрозоля с использованием различных типов лазерных источников [1]. Преимуществом активного лазерного зондирования является то, что излучение лазера характеризуется высокой энергией и короткой длительностью импульсов, малой угловой расходимостью, широким спектральным диапазоном длин волн генерации (от УФ до дальнего ИК). Лазерные локаторы (лидары) наиболее перспективны для мониторинга характеристик аэрозольных образований, включая оперативное определение размеров и состава аэрозольных частиц в масштабе реального времени [2–7]. В настоящее время для зондирования органических соединений в аэрозолях природного и антропогенного происхождения используются лидары с лазерами

УФ-диапазона для дистанционного возбуждения спектров флуоресценции и комбинационного рассеяния с их последующим анализом [8–10]. Недостаток таких лидаров – трудность их использования в дневное время из-за сильного фона солнечной радиации. Кроме того, УФ-излучение сильно ослабляется в атмосфере (аэрозольное рассеяние, полосы поглощения озона), что существенно ограничивает дальность действия лидаров. Поэтому исследователи обратили внимание на возможности зондирования органики в аэрозолях по сигналам обратного рассеяния импульсов лазеров ИК-диапазона, перестраиваемых по длине волны [11–13]. В длинноволновом ИК-диапазоне влияние солнечной засветки несущественно, как и ослабление излучения в атмосфере. Это увеличивает дальность действия лидаров и дает возможность работы в любое время суток. В серии лабораторных экспериментов [14] показана возможность детектирования органических соединений в аэрозоле с использованием 19 длин волн в диапазоне 9,23–10,696 мкм и приведены результаты сравнения данных модельных расчетов и экспериментов.

В настоящей работе представлены экспериментальный стенд, созданный для анализа обратнорассеянного излучения CO₂-лазера от аэрозольных частиц по схеме лидарного зондирования на протяженной контролируемой трассе, а также результаты исследований водного аэрозоля с растворенными органическими примесями.

* Антон Владимирович Климкин (anton@iao.ru); Алексей Александрович Карапузиков (sales@lc-solutions.com); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Алексей Николаевич Куряк (kurjak@iao.ru); Константин Юрьевич Осипов (osipov@iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yurpon@iao.ru); Шо Чжан (862238537@qq.com).

Экспериментальный стенд, методика и результаты измерений

В эксперименте использовался разработанный ранее [15] и модернизированный для настоящей работы оптический стенд, схема которого приведена на рис. 1.

Стенд состоит из двух разнесенных блоков. Блок I – аэрозольная камера 1 с открывающимися прозрачными для излучения лазера герметизируемыми окнами и генераторами аэрозоля 2. Блок II – приемно-передающий комплекс. В него входят: лазер 3 с зеркальным внеосевым коллиматором излучения, приемник 6 с зеркальным объективом 4, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7 и компьютер 8. В камере генераторами аэрозоля создается облако, имитируя аэрозольное образование в атмосфере. Излучение лазера через коллиматор направляется в аэрозольную камеру, где частично рассеивается аэрозолем, в том числе назад. Часть рассеянного назад излучения попадает в объектив и фотоприемник. Сигнал от фотоприемника оцифровывается и обрабатывается компьютером, который также управляет работой лазера. При сильных сигналах обратного рассеяния может наступать насыщение фотоприемника. В этом случае используется ослабляющий фильтр 5.

В качестве источника излучения применялся перестраиваемый CO₂-лазер на Z-образном волноводе с ВЧ-накачкой (разработка ООО «Специальные технологии»). Пределы перестройки лазера – от линии 9R(40) до линии 10P(46), что соответствует длинам волн от 9,1741 мкм до 10,885 мкм. Для приема излучения использовался охлаждаемый жидким азотом КРТ-фотоприемник производства Института полупроводников СО РАН (Новосибирск, Россия).

Спектр излучения лазера представлен на рис. 2. Средняя мощность излучения была замерена фотоприемником OPHIR, установленным в пучке лазера. Для контроля мощности генерации часть излучения отводилась с помощью плоскопараллельной пластины из ZnSe на опорный фотоприемник МГ-30.

Для получения аэрозоля использовался ультразвуковой генератор «Вулкан-3», который генерирует аэрозольные частицы диаметром 5 мкм (80%) и 20 мкм (20%). Эти параметры соблюдались и при распылении масляных водных растворов 10%-й концентрации и спиртовых водных растворов 5%-й концентрации. Генератор нагревал распыляемый раствор до 27–30 °С и поддерживал эту температуру.

На первом этапе измерялся нулевой (фоновый) сигнал в пустой аэрозольной камере. Для этого включался лазер на одной из сильных линий (использовалась линия 10P(20)) и измерительный канал. По сигналу с КРТ-фотоприемника регистрировался фоновый сигнал в аэрозольной камере. Измеренный таким образом уровень фонового сигнала использовался для определения степени очистки аэрозольной камеры от исследуемого вещества.

Далее эксперимент проводился по следующей схеме.

1. 40 мл раствора помещали в сосуд генератора аэрозоля, нагревающего этот раствор до рабочей температуры 27–30 °С.

2. Включался ультразвуковой распылитель генератора, и генерируемый аэрозоль поступал в аэрозольную камеру. Непрерывно измерялся сигнал обратного рассеяния на той же сильной линии, которая использовалась при измерении фонового сигнала. Когда сигнал обратного рассеяния от аэрозоля переставал увеличиваться, считалось, что внутри камеры аэрозоль пришел в равновесное состояние.

3. Лазер переключался в режим автоматического сканирования от линии 9R(40) до 10P(46), и записывался сигнал обратного аэрозольного рассеяния от каждого распыленного вещества. Всего использовалось 80 лазерных линий в полосах 9P(46)–9P(6), 9R(4)–9R(40), 10P(46)–10P(4), 10R(2)–10R(46), измерение на каждой линии проводилось в течение 5 с. Линии с минимальной мощностью излучения (< 100 мВт) не использовались. Сканирование осуществлялось путем задания необходимого числа шагов шагового двигателя исполнительного механизма, управляющего дифракционной решеткой

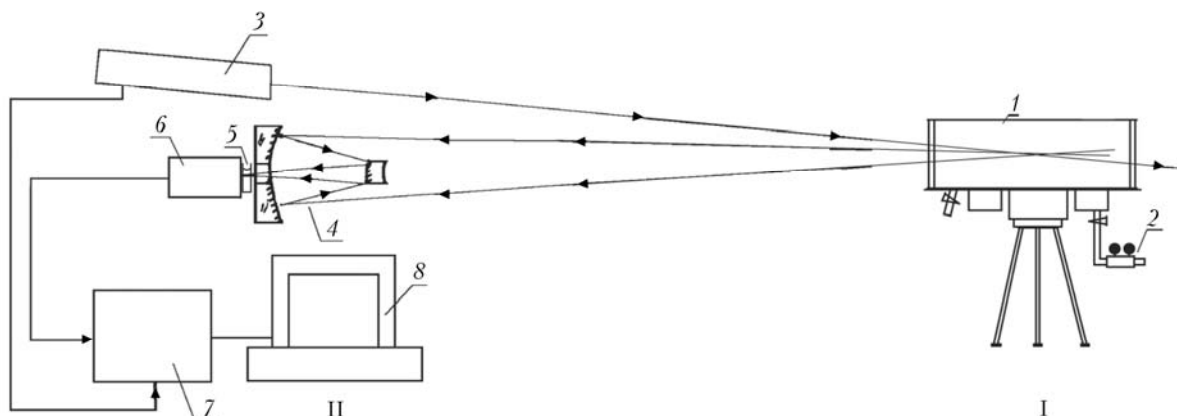


Рис. 1. Схема модернизированного экспериментального стенда: I – мобильная часть; II – стационарная часть; 1 – аэрозольная камера; 2 – генератор аэрозоля; 3 – лазер; 4 – приемный объектив; 5 – фильтр; 6 – КРТ-фотоприемник; 7 – АЦП; 8 – компьютер

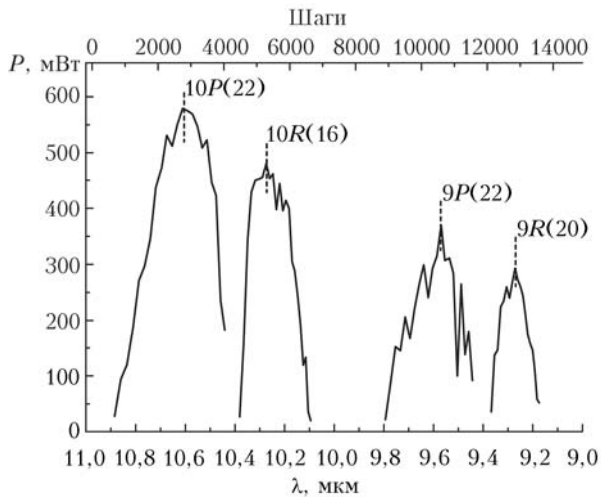


Рис. 2. Спектр излучения лазера

в резонаторе лазера. Всего диапазон перестройки от линии 10P(46) до 9R(40) содержал 13000 шагов. Соответствие шагов и длин волн представлено на рис. 2.

4. Для контроля возможных ошибок сигнал от каждого вещества записывался дважды.

5. Выключался генератор аэрозоля, лазер устанавливался на ту же сильную линию, которая использовалась при измерении фонового сигнала.

6. Включался продув аэрозольной камеры, и по сигналу с КРТ-фотоприемника контролировалась очистка камеры от аэрозоля.

7. После уменьшения сигнала до уровня фонового продувка выключалась и начинался следующий цикл измерений или заменялось исследуемое вещество.

Исследовались:

- дистиллированная вода, двойная дистилляция;
- глицерин, 10%-й водный раствор;
- спирт изопропиловый, 5%-й водный раствор;
- триптофан, насыщенный водный раствор;
- никотинидадениндинуклеотид (NADH), насыщенный водный раствор;
- в качестве нейтрального органического вещества использовался концентрированный настой ферментированного китайского чая (пуэр).

Кроме двойного прохождения всего спектрального диапазона лазера с накоплением сигнала в течение 5 с на каждой линии, была проведена вторая серия измерений с промежутком в один день, при этом раствор исследуемого вещества готовился заново. Рис. 3 демонстрирует, как меняется спектр сигнала обратного рассеяния водяным туманом со временем.

На рис. 4 приведены спектры сигналов рассеяния триптофана. Поскольку концентрация частиц аэрозоля не контролировалась и могла отличаться в разные дни, на рис. 4, б спектры приведены к единице в районе линии 10P(22) (~2500 шагов). Отличие спектров в разные дни здесь больше, чем для чистой воды, но, за исключением нескольких слабых линий, не превышает 10%. Наибольшие различия среди исследованных веществ зафиксированы

для изопропанола, что может объясняться его высокой летучестью.

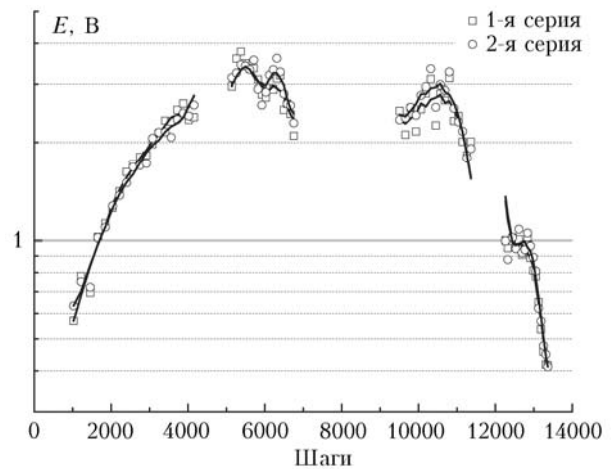


Рис. 3. Спектр обратного рассеяния водяного тумана, измеренный в течение двух дней

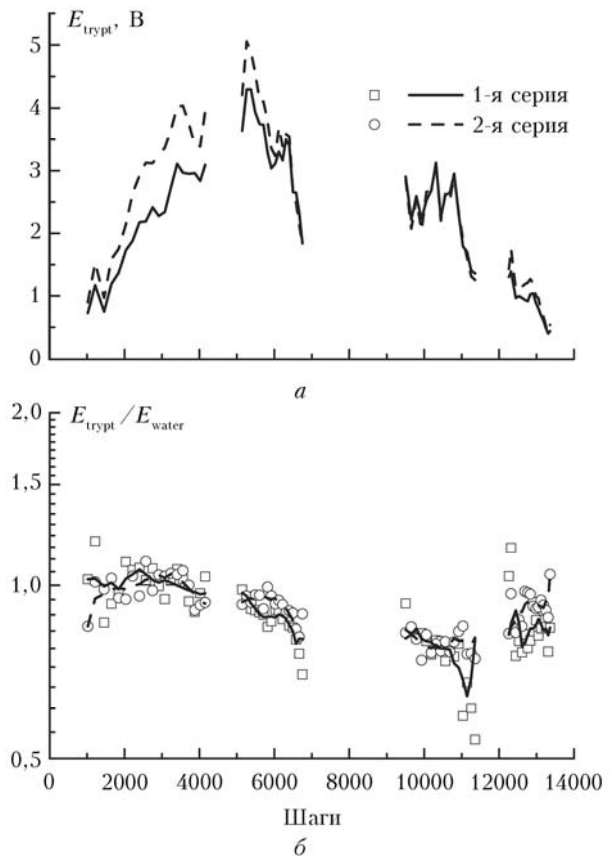


Рис. 4. Спектр обратного рассеяния триптофана: а – спектры, измеренные в течение двух дней; б – отношение спектра триптофана к спектру чистой воды

Итоговые спектры сигналов обратного рассеяния для исследованных веществ приведены на рис. 5. Показано отношение интенсивностей сигналов рассеяния вещества и чистой воды, приведенное к единице в районе линии 10P(22) (~2500 шагов). Для триптофана и NADH приведены расхождения в первый и второй дни измерений.

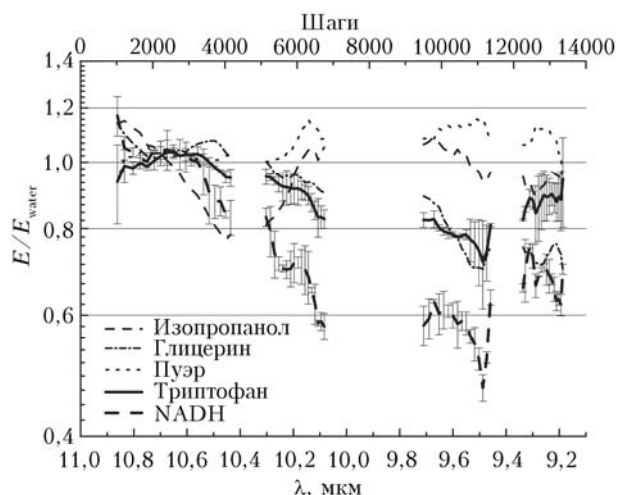


Рис. 5. Нормированные спектры рассеяния изучаемых веществ; пределы – расхождения спектров в разных сериях измерений

Видно, что спектр нейтрального органического вещества (пуэр) в пределах погрешностей не отличим от спектра воды и не может быть идентифицирован. Спектр изопропанола заметно отличается от спектра воды в районе 10,6–10,2 мкм. Наибольшие различия зафиксированы для NADH, спектр которого существенно отличается от спектра воды при $\lambda < 10,5$ мкм.

Заключение

Таким образом, экспериментальное наблюдение спектров обратного рассеяния аэрозоля, содержащего некоторые органические вещества (такие, как триптофан и NADH), показало существенные отличия этих спектров от спектра чистого водяного тумана в диапазоне длин волн 9,4–10,6 мкм. Это подтверждает возможность диагностики состава органического аэрозоля с использованием DISC-технологии (Differential Scattering technology – технологии дифференциального рассеяния) в LWIR (Long-Way InfraRed – дальнего ИК) лидарах.

Работа выполнена в рамках проекта № АААА-А17-117033010037.

1. *Measures R.M.* Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Malabar, Florida, USA: Krieger publishing company, 1992. 510 p.
2. *Warren R.E., Vanderbeek R.G., Ben-David A., Ahl J.L.* Simultaneous estimation of aerosol cloud concentration

A.V. Klimkin, A.A. Karapuzikov, G.P. Kokhanenko, A.N. Kuryak, K.Yu. Osipov, Yu.N. Ponomarev, Shuo Zhang. Use of the long-wave range for remote sensing of atmospheric aerosols.

The results of laboratory experiments on recording the backscattered IR laser radiation from aerosol particles containing organic impurities are presented. The studies were performed at the laboratory test bench according to the lidar sensing scheme along a controlled optical path. Aqueous aerosol and aqueous solutions were used as model media. Aerosol and solutions contained organic impurities: tryptophan, isopropyl alcohol, glycerin, and nicotinamide adenine dinucleotide (NADH). For research in the IR range, the experimental complex was modified. The UV laser was replaced with an IR laser during this upgrade. A liquid-nitrogen-cooled mercury-cadmium-telluride based IR detector was used to record backscatter signals. A possibility of using IR lasers with scanning the radiation frequency for remote sensing of atmospheric organic aerosols is shown.

and spectral backscatter from multiple-wavelength LIDAR data // *Appl. Opt.* 2008. V. 47, N 24. P. 4309–4320.

3. *Swim C., Vanderbeek R., Emge D., Wong A.* Overview of chem-bio sensing // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6218, P. 730408.
4. *Gurton K.P., Ligon D., Dalmani R.* Measured infrared optical cross sections for a variety of chemical and biological aerosol stimulants // *Appl. Opt.* 2004. V. 43, N 23. P. 4564–4570.
5. *Richardson J.M., Aldridge J.C., Milstein A.B., Laci-rignola J.J.* Aerosol elastic scatter signature in the near and mid-wave IR spectral regions // *Proc. SPIE.* 2009. V. 7323. P. 73230Q-1–9.
6. *Warren R.E., Vanderbeek R.G., Ahl J.L.* Detection and classification of atmospheric aerosol using multi-wavelength LWIR LIDAR // *Proc. SPIE.* 2009. V. 7304. P. 73040E-1–7.
7. *Thrush E., Salciccioli N., Brown D.M., Siegrist C., Brown A.M., Thomas M.E., Boggs N., Carter C.C.* Backscatter signatures of biological aerosols in the infrared // *Appl. Opt.* 2012. V. 51, N 12. P. 1836–1842.
8. *Baxter K., Castle M., Barrington S., Withers P., Foot V., Pigkering A., Felton N.* UK small scale UVLIF LIDAR for standoff BW detection // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6739. P. 67390Z-1–10.
9. *Gritsuta A.N., Klimkin A.V., Kokhanenko G.P., Kuryak A.N., Osipov K.Yu., Ponomarev Yu.N., Simonova G.V.* Mobile multi-wavelength aerosol lidar // *Int. J. Remote Sens.* 2018. V. 39, N 24. P. 9400–9414.
10. *Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И.* Дистанционное обнаружение следов высокоэнергетических материалов на идеальной подложке с помощью эффекта СКР // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 691–695; *Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I.* Remote Detection of Traces of High-Energy Materials on an Ideal Substrate Using the Raman Effect // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 604–608.
11. *Fiorani L., Colao F., Palucci A.* Measurement of Mount Etna plume by CO₂-laser-based lidar // *Opt. Lett.* 2009. V. 34, iss. 6. P. 800–802.
12. *Романовский О.А., Садовников С.А., Харченко О.В., Яковлев С.В.* Дистанционный анализ содержания метана в атмосфере ИК-лидарной системой дифференциального поглощения в спектральном диапазоне 3300–3430 нм // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 11. С. 896–901.
13. *Hu Yihua, Zhao Xinying, Gu Youlin, Chen Xi, Wang Xinyu, Wang Peng, Zheng Zhiming, Dong Xiaohao.* Significant broadband extinction abilities of bioaerosols // *Sci. China Mater.* 2019. V. 62, N 7. P. 1033–1045.
14. *Thrush E., Salciccioli N., Brown D.M., Siegrist K., Brown A.M., Thomas M.E., Boggs N., Carter C.C.* Backscatter signatures of biological aerosols in the infrared // *Appl. Opt.* 2012. V. 51, N 12. P. 1836–1842.
15. *Klimkin A., Kokhanenko G., Kuryak A., Osipov K., Sokovikov V., Zhang Shuo.* New stand for fluorescence study // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10614. P. 106140S-1–5.