

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 621.373.826; 535.33; 662.2

Дистанционный детектор опасных веществ на основе перестраиваемого $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера

Б.Г. Агеев, А.В. Климкин, А.Н. Куряк, К.Ю. Осипов, Ю.Н. Пономарев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.01.2017 г.

Дано описание разработанного макета дистанционного детектора паров опасных веществ на основе перестраиваемого лазера на изотопе $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$. Приведены результаты тестовых измерений пропускания излучения лазера парами органических жидкостей (ацетон, аммиак, этанол, бензин). Экспериментально реализовано дистанционное (до 100 м) детектирование паров ацетона и аммиака.

Ключевые слова: дистанционное детектирование, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер, опасные вещества; remote detection, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ laser, hazardous substances.

Введение

В последние годы возрастает интерес к лазерным методам обнаружения вредных и опасных примесей в открытой атмосфере [1]. Это обусловлено появлением серийных лазеров с высокой мощностью, перестраиваемых по длине волны в различных спектральных диапазонах, новых высокочувствительных быстродействующих приемников, а также развитием методов спектроскопии и методов математической обработки результатов измерений. Лазерные детекторы позволяют решать оперативные задачи по дистанционному обнаружению опасных веществ в атмосфере в режиме реального времени [2].

Детектирование и идентификация неорганических и органических соединений, в том числе паров взрывчатых веществ (ВВ) и других опасных веществ, лазерными методами основаны на характерных особенностях их электронно-колебательно-вращательных спектров [3, 4]. Знание этих спектров в широком диапазоне обеспечивает выбор оптимальных длин волн лазерных источников излучения для конкретного вещества.

В данной работе описывается лабораторный макет дистанционного детектора газов и паров опасных веществ на основе частотно-импульсного перестраиваемого лазера на изотопе $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$. Использование линий генерации $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера позволяет избежать влияния поглощения атмосферным углекислым газом [5]. Кроме того, в диапазон генерации лазера попадают интенсивные линии поглощения ряда токсичных газов и паров токсичных

веществ, таких как аммиак (NH_3), озон (O_3), окись хлора (ClO), двуокись серы (SO_2), азотная кислота (HNO_3), муравьиная кислота (HCOOH) [6], а также паров некоторых суррогатных взрывчатых веществ (СВВ), например перекисных соединений типа триацетонтрипероксида [7]. В качестве ингредиента этого ВВ используется ацетон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$). Он же выделяется и при распаде таких ВВ, а следовательно, может являться одним из маркеров их наличия.

В работе также приведены дискретные спектры пропускания паров ряда органических жидкостей (аммиака, ацетона, этанола, бензина), измеренные на длинах волн используемого лазера. Экспериментально показана возможность дистанционного детектирования паров ацетона и аммиака на расстоянии до 100 м при концентрациях на уровне 200 ppm.

Дистанционный детектор паров

При разработке макета прибора для дистанционного детектирования паров веществ использован оптический эффект поглощения излучения при прохождении его по атмосферной трассе с искомым веществом, с рассеянием лазерного пучка на топографической мишени и детектированием рассеянного сигнала. За основу схемного решения взят детектор, разработанный авторами ранее [8], с заменой одночастотного $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера на перестраиваемый.

Блок-схема лазерного трассового детектора показана на рис. 1, общий вид – на рис. 2. Макет выполнен в виде автономного стенда с габаритными размерами приемопередающей части не более $1000 \times 900 \times 700$ мм³. Составные части приемо-передатчика монтируются (см. рис. 2) на оптической плите фирмы THORLABS Inc. (США). В верхней части стенда смонтирован передающий тракт, состоящий из $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера, интегрирующей сферы с фотоприемником опорного канала, коллимирующей

* Борис Григорьевич Агеев (ageev@asd.iao.ru); Антон Владимирович Климкин (tosha@asd.iao.ru); Алексей Николаевич Куряк (alex@asd.iao.ru); Константин Юрьевич Осипов (Osipov@iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yurpon@iao.ru).

шего объектива, системы зеркал и вспомогательного юстировочного полупроводникового лазера видимого (зеленого) света. Приемный тракт, расположенный в нижней секции стенда, состоит из телескопа и фотоприемника измерительного канала. Стенд со всей приемопередающей частью может устанавливаться либо в стационарном пункте, либо на мобильном носителе.

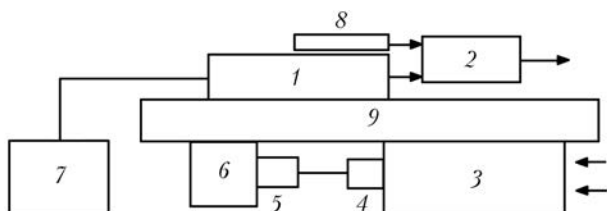


Рис. 1. Блок-схема трассового детектора: 1 – зондирующий лазер с источником питания и управления; 2 – коллиматор; 3 – приемный телескоп; 4 – фотоприемник с источником питания; 5 – АЦП; 6 – персональный компьютер; 7 – система термостатирования зондирующего лазера; 8 – юстировочный лазер; 9 – несущая конструкция (плита)

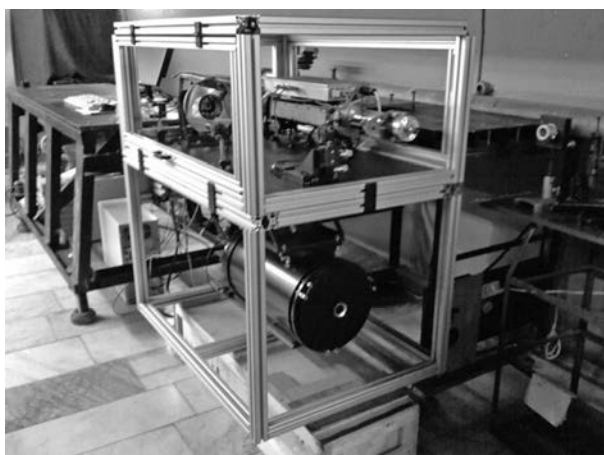


Рис. 2. Общий вид трассового детектора

В качестве лазерного источника использовался автоматизированный волноводный $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер с высокочастотным (ВЧ) возбуждением на основе Z-образного резонатора с перестройкой длины волны излучения по линиям P-ветви $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ в диапазоне 10,99–11,4 мкм (20 линий генерации), разработанный и изготовленный ООО «Специальные технологии», г. Новосибирск [9]. Управление перестройкой лазера по линиям генерации производится контроллером, который обеспечивает поворот шаговым двигателем дифракционной решетки резонатора в положение, соответствующее требуемой линии генерации. Положение решетки определялось предварительной калибровкой. В состав лазера входят лазерная головка, ВЧ-генератор и блок питания. Конструкция лазера предусматривает возможность воздушного и жидкостного охлаждения. Максимальная средняя мощность генерации на сильных линиях достигает 5 Вт при водяном охлаждении и порядка 0,4 Вт в режиме воздушного охлаждения.

В состав передающей системы детектора наряду с лазерным источником входит компактная зеркальная двухкомпонентная перестраиваемая коллимирующая оптическая система, позволяющая одновременно проводить юстировку всего оптического тракта. Оптика выполнена из сферических зеркал, обеспечивающих фокусировку излучения на требуемую дистанцию (50–100 м) передвижением одного из зеркал вдоль оптической оси на расстояние ± 5 мм.

В опорном и измерительном каналах применялись фотоприемники, предназначенные для регистрации модулированного излучения в диапазоне длин волн от 2 до 20 мкм. В качестве опорного приемника использовался пироприемник МГ-30 (пороговая чувствительность в единичной полосе частот 10^{-9} Вт · Гц $^{1/2}$), для измерительного канала – охлаждаемый жидким азотом фотодетектор КРТ (удельная обнаружительная способность $3 \cdot 10^{10}$ Вт $^{-1}$ · Гц $^{1/2}$ · см).

Система приема представляет собой телескопический объектив Кассегрена в сочетании с охлаждаемым фотоприемником. Объектив Кассегрена имеет апертуру главного зеркала 250 мм и сфокусирован на дистанцию 75 м.

Для эффективной работы макета разработана система автоматизации процедуры измерений: сигналы с фотоприемников опорного и измерительного каналов подаются на вход внешней платы АЦП, установленной в компьютере, а также к осциллографу для контроля. Перестройка длины волны излучения, регистрация, сбор и предварительная обработка данных выполняются программой, разработанной в среде программирования LabView. При этом амплитуды сигналов фотоприемников измеряются, усредняются и записываются в память компьютера. В качестве устройства для измерения и оцифровки амплитуд сигналов с фотоприемников измерительного и опорного каналов используется плата АЦП National Instruments NI PCI 6251.

Результаты тестовых лабораторных измерений

Перед проведением испытаний макета была выполнена серия экспериментов по измерению пропускания излучения лазера на молекуле $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ парами ряда химических веществ, были исследованы спектры насыщенных паров этих веществ в смеси с воздухом.

Использовались следующие вещества:

- 1) аммиак (NH_3) – жидкий, медицинский раствор;
- 2) ацетон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) – жидкий, химически чистый;
- 3) этанол ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) – жидкий, ректификат;
- 4) бензин – жидкий, бытовой растворитель.

Выбор веществ обусловлен тем, что аммиак и ацетон являются явными индикаторами СВВ, а этанол и бензин, будучи летучими огнеопасными жидкостями, имеют сильные линии поглощения в области генерации $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера.

Измерения пропускания паров выполнены на стенде по стандартной спектрофотометрической

схеме, принципиальный вид которой показан на рис. 3. Пропускание поглощающего слоя определялось по формуле

$$T = (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})(U_{0\text{вых}}/U_{0\text{вх}}),$$

где U — сигналы фотоприемников, символы «вых» и «вх» соответствуют значениям U измерительного и опорного каналов соответственно; символ «0» соответствует отсутствию исследуемого вещества.

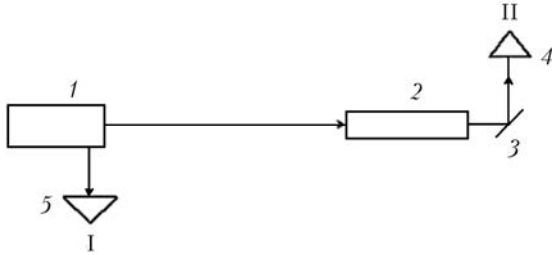
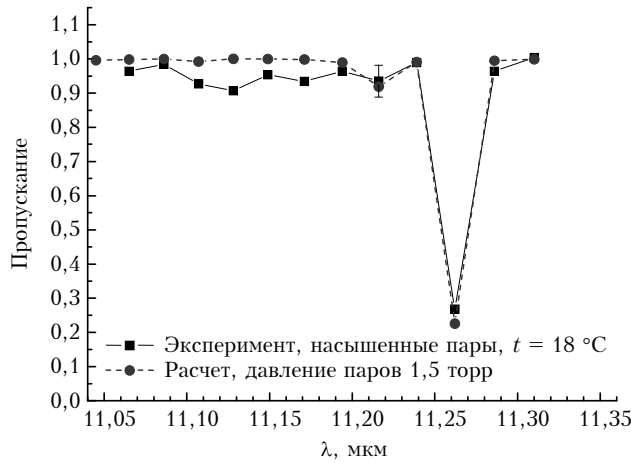
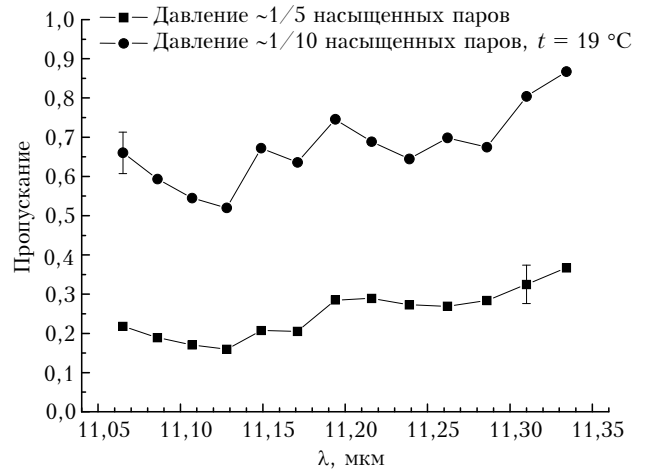


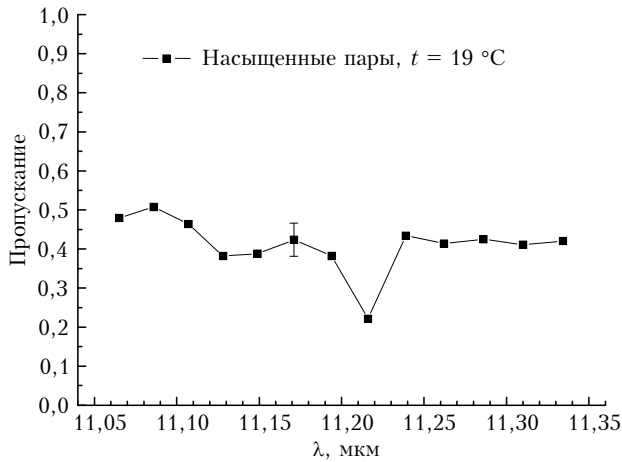
Рис. 3. Схема тестовых измерений: I — опорный канал; II — измерительный канал; 1 — $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер; 2 — абсорбционная кювета; 3 — светоделитель; 4, 5 — фотоприемники



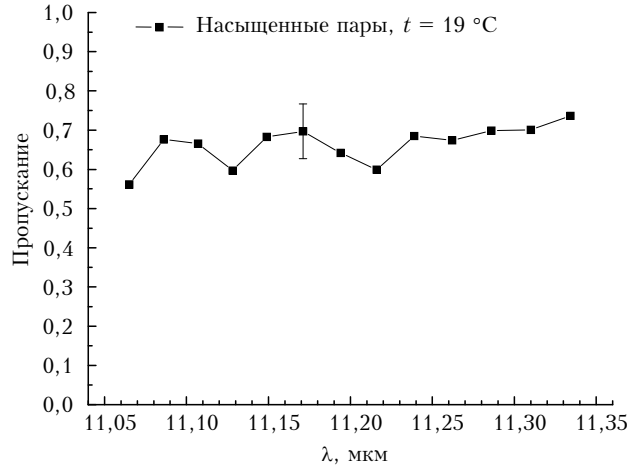
а



б



в



г

Рис. 4. Измеренные спектры пропускания паров: а — аммиак; б — ацетон; в — этанол; г — бензин

Для регистрации излучения в опорном и измерительном каналах использовались пироэлектрические приемники МГ-30.

Для создания поглощающего слоя паров применялась абсорбционная кювета, представляющая собой стеклянную трубку $\varnothing 20 \times 500$ мм. Торцы трубки закрыты оптическими окнами из BaF_2 . Кювета обеспечивала герметичность внутреннего объема. В случае заполнения кюветы воздухом определялись «нулевые» значения сигналов U . Исследуемая газовая смесь создавалась путем напуска насыщенных паров из сосуда, содержащего соответствующее вещество, в предварительно вакуумизированную кювету, после чего проводилась регистрация значений $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$.

На рис. 4 приведены полученные результаты. На рис. 4, а для сравнения также показаны результаты расчета, выполненного по литературным данным для условий эксперимента.

Видно их вполне удовлетворительное соответствие. Наличие одиночной линии поглощения в спектре NH_3 позволило проверить шкалу перестройки длин волн излучения лазера.

Методика испытаний макета

Лабораторные испытания макета детектора паров проводились на закрытой трассе в ИОА СО РАН по спектрофотометрической схеме (рис. 5). Макет настраивался на трассовые измерения: рассеиватель, моделирующий топографический отражатель, размещался на расстоянии 77 м от макета, на расстоянии 65 м размещалась кювета с парами аммиака или ацетона, имитирующая СВВ.

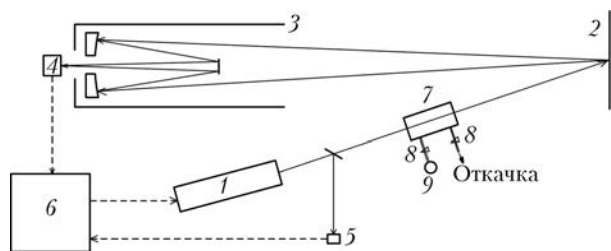


Рис. 5. Схема трассовых измерений: 1 - $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер; 2 - рассеиватель; 3 - приемный телескоп; 4 - измерительный фотоприемник; 5 - опорный фотоприемник; 6 - персональный компьютер; 7 - кювета; 8 - краны; 9 - сосуд с ацетоном или аммиаком

Процедура трассовых измерений была аналогична проведенным стендовым. В данном случае

использовалась абсорбционная кювета, представляющая собой металлическую трубу $\text{Ø}68 \times 620$ мм. В торцах трубы установлены оптические окна из KRS-5 (бромистый галлий — йодистый галлий) и штуцера для прокачки. В случае заполнения кюветы воздухом определялись «нулевые» значения сигналов фотоприемников. Поглощающая среда — смесь паров аммиака или ацетона с воздухом — готовилась путем продувки через кювету насыщенными паров. Продувка осуществлялась воздушным компрессором со скоростью ~ 2 л/мин до достижения стабильного значения сигнала фотоприемника в измерительном канале, после чего продувка отключалась и вновь проводилась регистрация значений сигналов фотоприемников опорного и измерительных каналов.

Фрагмент записи сигнала при регистрации паров ацетона на линии генерации с длиной волны 11,193 мкм показан на рис. 6. Оценка концентрации паров в кювете дала величину ~ 263 ppm с погрешностью ± 30 ppm.

На рис. 7 показана запись изменения пропускания кюветы с парами аммиака ($\sim 200 \pm 20$) ppm при сканировании длины волны излучения. Отчетливо наблюдается уменьшение пропускания газовой смеси при числе шагов сканирования ~ 1800 , которое соответствует настройке резонатора лазера на линию P30 (11,262 мкм).

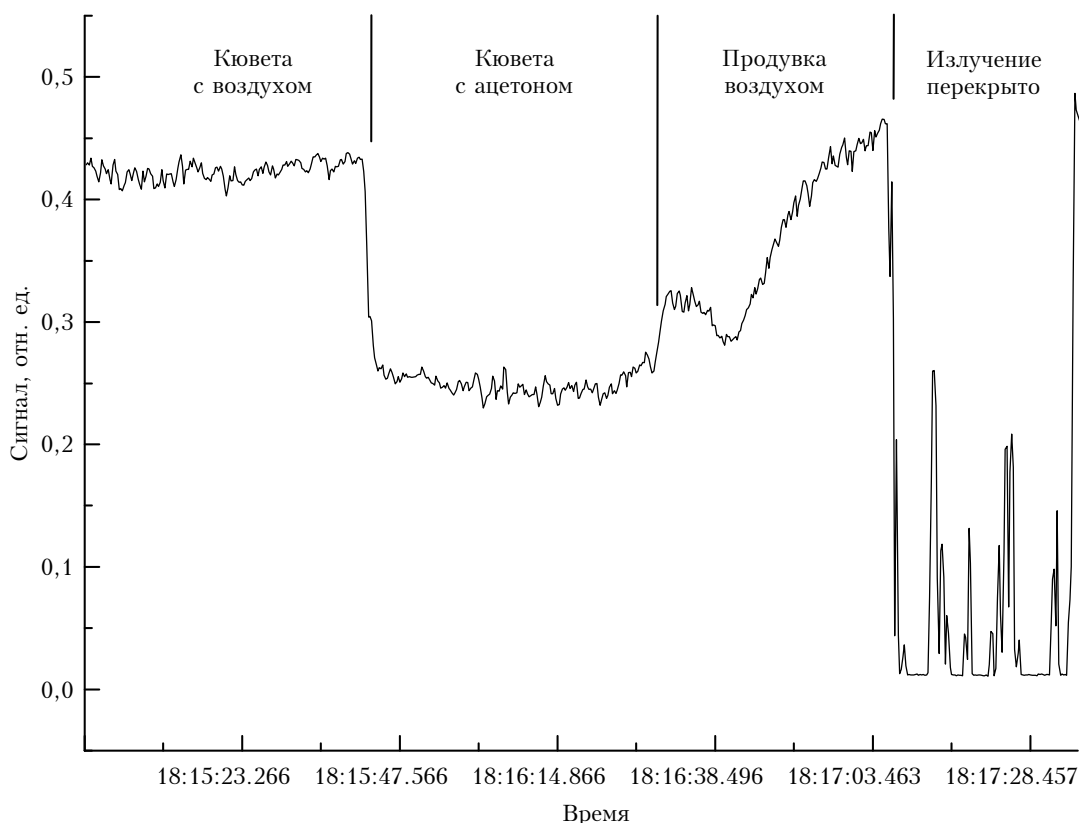


Рис. 6. Зависимость сигнала фотоприемника измерительного канала от времени при регистрации паров ацетона на длине волны 11,193 мкм

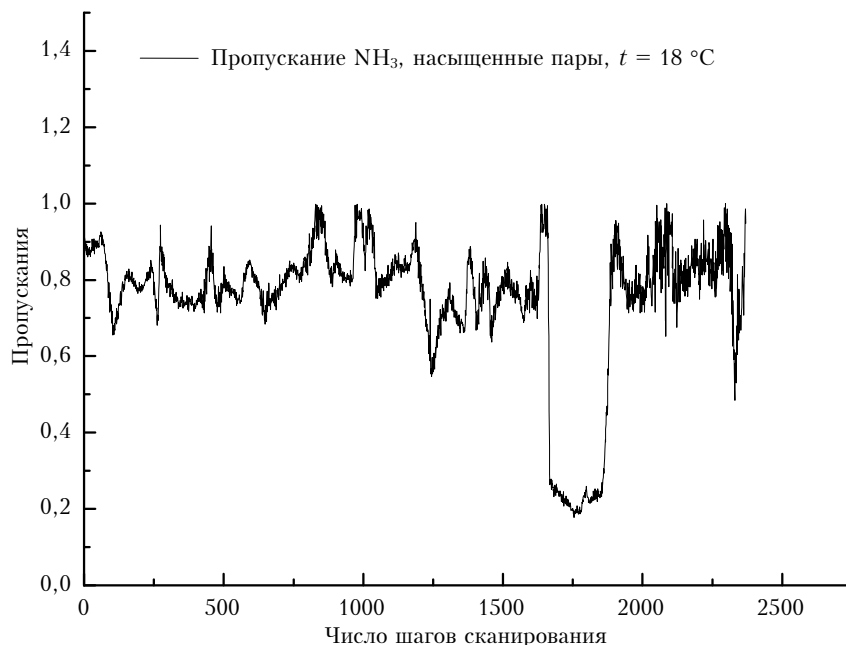


Рис. 7. Зависимость пропускания кюветы с парами аммиака от числа шагов сканирования

Заключение

В результате проведенной работы на базе перестраиваемого лазера на изотопе углерода $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ разработан и изготовлен макет лазерного детектора паров опасных веществ.

Выполнены лабораторные экспериментальные исследования по локальному детектированию паров химических веществ (аммиак, ацетон, этанол, бензин).

Экспериментально диагностировано наличие паров ацетона и аммиака в локализованном участке длиной 60 см на дистанции до 100 м при концентрациях ~ 200 ppm и отношении сигнал/шум ~ 10 .

Разработанный макет может стать основой для создания дистанционных газоанализаторов ряда токсичных химических соединений на производстве или в службах экологического мониторинга.

Работа выполнена в рамках Проекта VIII.80.1.3 Программы фундаментальных исследований государственных академий наук.

1. Munson C.A., Gottfried J.L., De Lucia F.C., McNesby K.L., Miziolek A.W. Laser-Based Detection Methods for Explosives. Rep. N ADA474060. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Weapons and Materials Research Directorate, 2007. 76 p.
2. Steinfeld J.I., Wormhoudt J. Explosives detection: A challenge for physical chemistry // Annu. Rev. Phys. Chem. 1998. V. 49. P. 203–232.
3. Nakamoto K. Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Part A&B. N.Y.: Wiley-Interscience, 2008. 1000 p.

4. Набиев Ш.Ш., Ставровский Д.Б., Палкина Л.А., Збарский В.Л., Юдин Н.В., Голубева Е.Н., Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Собакинская Е.А., Черняева М.Б. Спектрохимические особенности некоторых бризантных взрывчатых веществ в парообразном состоянии // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 273–285; Nabiev Sh.Sh. Stavrovskii D.B., Palkina L.A., Zbarskii V.L., Yudin N.V., Golubeva E.N., Waks V.L., Domracheva E.G., Sobakinskaya E.A., Chernyaeva M.B. Spectrochemical features of certain brisant explosives in the vapor state // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 5. P. 377–390.
5. Старовойтов В.С., Трушин С.А., Чураков В.В. Оптико-акустический газоанализатор многокомпонентного загрязнения воздуха на основе $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера // Ж. прикл. спектроскопии. 1999. Т. 66, № 3. С. 345–350.
6. Старовойтов В.С., Трушин С.А., Чураков В.В. Использование лазеров на изотопозамещенных молекулах CO_2 при оптико-акустическом контроле загрязнения атмосферы // Ж. прикл. спектроскопии. 1993. Т. 59, № 5–6. С. 504–509.
7. Pal A., Clark C.D., Sigman M., Killinger D.K. Differential absorption lidar CO_2 laser system for remote sensing of TATP related gases // Appl. Opt. 2009. V. 48, N 4. P. B145–B150.
8. Сакович Г.В., Чернов А.И., Силантьев С.В., Ворожцов А.Б., Павленко А.А., Максименко Е.В., Макогон М.М., Клишкин А.В., Осипов К.Ю., Пономарев Ю.Н., Капитанов В.А., Агеев Б.Г. Макет дистанционного детектора взрывчатых веществ на основе изотопного CO_2 -лазера // Ползуновский вестник. 2010. № 4. С. 38–46.
9. <http://www.detectors.lc-solutions.com/>

B.G. Ageev, A.V. Klimkin, A.N. Kuryak, K.Yu. Osipov, Yu.N. Ponomarev. Remote detector of hazardous substances based on a tunable $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ laser.

Description of the developed prototype of a remote detector of hazardous substance vapors based on a tunable $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ laser is given. Results of test measurements of laser radiation transmission of organic liquid vapors (acetone, ammonia, ethanol, gasoline) are presented. The remote detection of acetone and ammonia vapors at distances up to 100 m is experimentally implemented.