

# МАКЕТ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ИЗОТОПНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

Г.В. Сакович<sup>1</sup>, А.И. Чернов<sup>2</sup>, С.В. Силантьев<sup>2</sup>, А.Б. Ворожцов<sup>1</sup>, А.А. Павленко<sup>1</sup>,  
Е.В. Максименко<sup>1</sup>, М.М. Макогон<sup>3</sup>, А.В. Клишкин<sup>3</sup>, К.Ю. Осипов<sup>3</sup>,  
Ю.Н. Пономарев<sup>3</sup>, В.А. Капитанов<sup>3</sup>, Б.Г. Агеев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий  
Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН)

<sup>2</sup>Федеральная служба безопасности РФ

<sup>3</sup>Учреждение Российской академии наук Институт оптики атмосферы Сибирского отделения  
РАН (ИОА СО РАН)

*В работе представлены результаты исследования возможности дистанционного обнаружения паров суррогатных взрывчатых веществ (ВВ) с использованием дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии. Показаны результаты лабораторных экспериментов по измерению пропускания паров суррогатных ВВ в ИК-области. Описана схема макета регистратора паров. Приведены результаты полевых испытаний прибора.*

*Ключевые слова: суррогатные взрывчатые вещества, дистанционное обнаружение, спектры поглощения и пропускания, лазерное детектирование*

## ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором обеспечения безопасности человека является своевременное обнаружение, идентификация и локализация источников опасности. Чем раньше и точнее будет определён такой источник, тем более эффективные меры могут быть приняты для его ликвидации и снижения последствий от его воздействия. В связи с этим на первый план выступают дистанционные, в том числе лазерные методы определения, позволяющие детектировать и идентифицировать опасность в реальном времени и на безопасном расстоянии от её источника.

Одной из наиболее актуальных задач оперативных служб любого развитого государства является эффективное противодействие угрозе проведения террористических актов с использованием взрывных устройств (ВУ) на основе взрывчатых веществ (ВВ). Оснащение этих служб современными средствами детектирования, позволяющими своевременно обнаружить ВВ и ВУ, является одним из необходимых условий успешного решения данной задачи.

В последнее время в террористических целях всё чаще применяются самодельные взрывные устройства, в которых в качестве заряда используются суррогатные кустарно изготовленные ВВ на основе триперекиси ацетона. Проблем обнаружения три- и диперекиси ацетона заключается в том, что данное высокочувствительное ВВ не имеет «типичных» для энергетических веществ взрывчатых групп и вообще не содержит

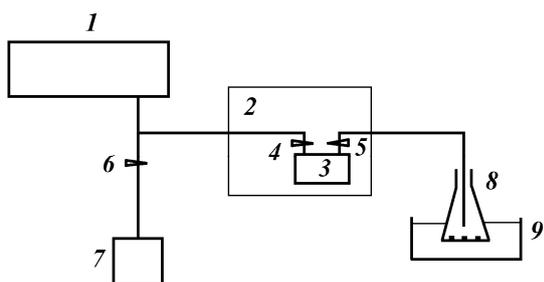
атомов азота – то есть тех признаков, на которые настроены практически все приборы для обнаружения ВВ.

Эффективным оптическим методом дистанционного детектирования паров таких веществ на атмосферной трассе является метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) в ИК-диапазоне с отражением излучения от топографической мишени. При этом частота излучения лазера должна перестраиваться таким образом, чтобы перекрывалась линия (полоса) поглощения анализируемого вещества, либо должны излучаться две длины волны, одна из которых находится вблизи частоты максимального поглощения, а вторая – вблизи минимального. Метод давно применяется для детектирования загрязняющих атмосферу газов с использованием, в частности, CO<sub>2</sub>-лазеров [1]. Потенциальная возможность контроля химических соединений определяется в этом случае их спектрами поглощения. Поэтому на первом этапе разработки детектора были проведены измерения спектров пропускания паров суррогатных ВВ с использованием ИК Фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801» (рисунок 1).

Измеренные таким образом спектры поглощения показаны на рисунке 2, где длина волны указана в микрометрах.

Анализ приведенных спектров показывает, что суррогатные ВВ могут быть обнаружены по спектрам поглощения в диапазоне 3.4±0,1 и 4.3±0,1 мкм, а перекисные соединения типа ТАТП – по спектрам в диапазонах 8,3 и 11,2 мкм.

## МАКЕТ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ИЗОТОПНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА



1 – балластный объем; 2 – фурье-спектрометр; 3 – кювета фурье-спектрометра; 4, 5, 6 – вакуумные краны; 7 – вакуумный насос; 8 – колба с образцом; 9 – емкость с водой для контролируемого нагрева ВВ

Рисунок 1. Схема измерения спектров поглощения

Практически весь требуемый диапазон спектра может быть перекрыт с помощью квантово-каскадных лазеров. Например, коммерческие серии лазерных излучателей

среднего ИК-диапазона (производство Daylight Solutions, USA [2] или MG Optical Solutions GmbH, Germany [3]) перекрывают диапазон длин волн от 4 до 12 мкм.

Область спектра вблизи 11,2 мкм может быть перекрыта перестраиваемым лазером на <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> изотопе, генерирующем порядка 30 линий. Хорошо отработанный и надежный лазер на <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> изотопе генерирует более чем на 70 переходах в диапазонах 9,2...9,8 и 10,2...10,9 мкм, излучение этого лазера может быть настроено так, что оно не будет ослабляться парами определяемых соединений. Таким образом, использование двух перестраиваемых лазеров на <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> и <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> изотопах позволит определить присутствие в атмосфере перекисных соединений типа ТАТП и ДАДП. Поэтому в качестве прототипа детектора был использован макет с <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> лазерным источником.

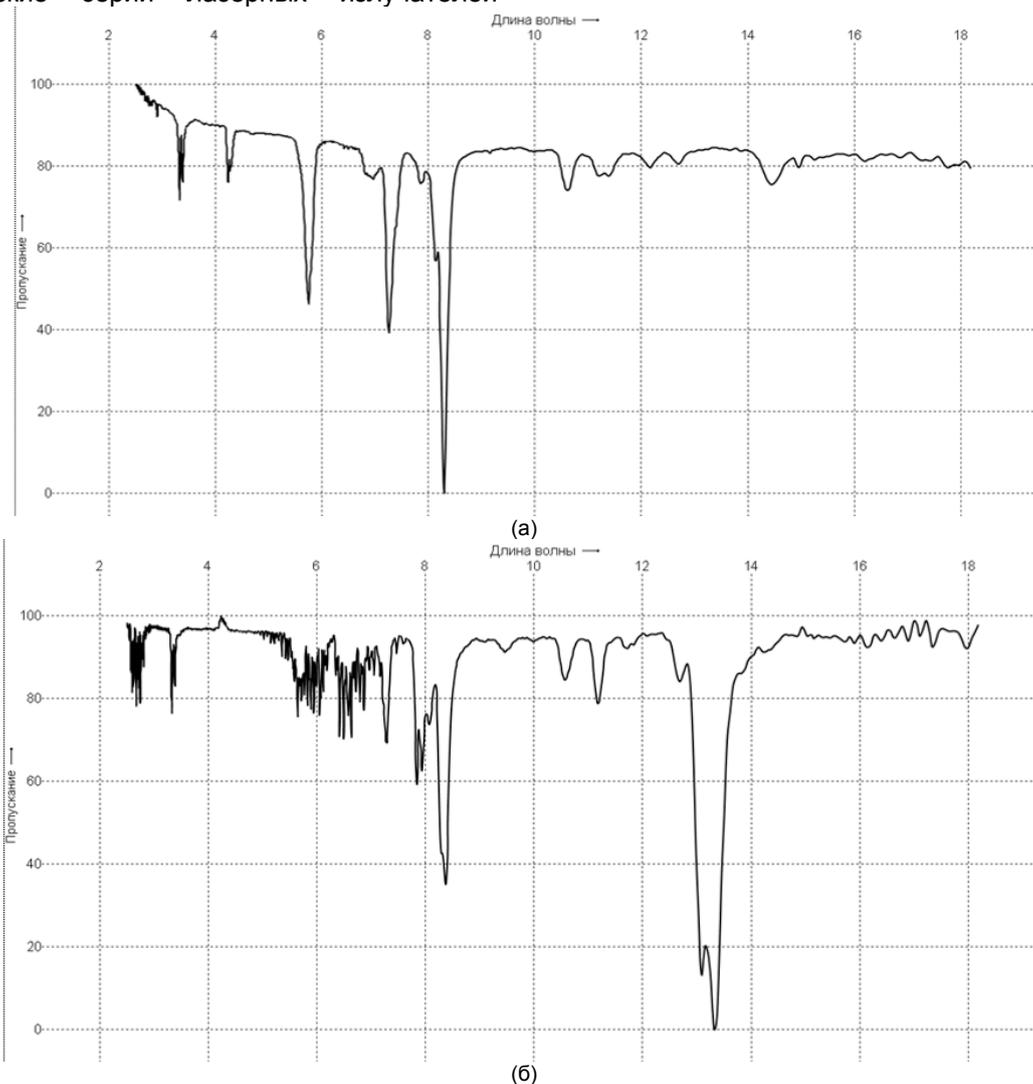


Рисунок 2. Спектры поглощения паров ДАТП (а), ТАТП(б), ГМТД(в), АС ДТ (г), АС АI (д)

САКОВИЧ Г.В., ЧЕРНОВ А.И., СИЛАНТЬЕВ С.В., ВОРОЖЦОВ А.Б., ПАВЛЕНКО А.А.,  
 МАКСИМЕНКО Е.В., МАКОГОН М.М., КЛИМКИН А.В., ОСИПОВ К.Ю., ПОНОМАРЕВ Ю.Н.,  
 КАПИТАНОВ В.А., АГЕЕВ Б.Г.

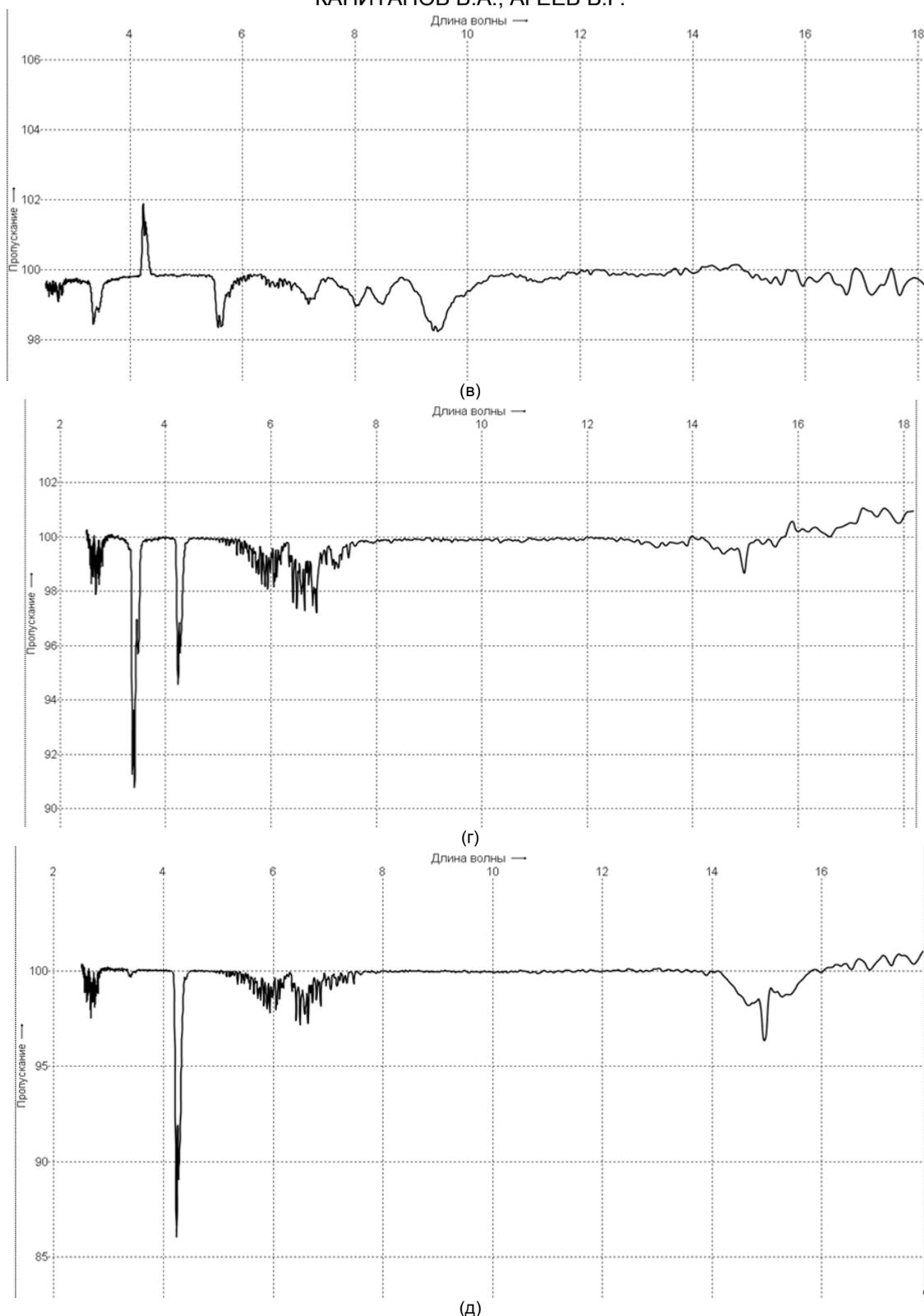


Рисунок 2 (продолжение). Спектры поглощения паров ДАТП (а), ТАТП(б), ГМТД(в), АС ДТ (г), АС АІ (д)

В качестве дополнительного маркера наличия ТАТП и ДАДП может также являться ацетон, так как он используется при произ-

водстве этих веществ и выделяется при их распаде.

## МАКЕТ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ИЗОТОПНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

### МАКЕТ ДЕТЕКТОРА

При разработке макета за основу взят метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии. Макет (рисунки 3, 4) выполнен в мобильном варианте и состоит из следующих основных частей: лазерного источника с коллиматором, приемной части и поворотного устройства. В качестве лазерного источника на настоящем этапе работ выбран лазер на изотопе <sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> с ВЧ-возбуждением и воздушным охлаждением, разработанный и изготовленный в Институте лазерной физики СО РАН, работающий в режиме свободной генерации на длинах волн 11,2 и 10,8 мкм с соотношением мощностей в среднем 3:1 соответственно. Приемное устройство состоит из телескопа типа Ньютона Ø 260 мм и f = 595 мм и фотоприемников опорного (пироприёмник МГ-33) и измерительного каналов (охлаждаемый жидким азотом КРТ-приёмник).



Рисунок 3. Внешний вид макета

На трубе телескопа смонтирован лазерный излучатель, на котором закреплен вспомогательный юстировочный полупроводниковый лазер видимого (красного) света. Также на трубе телескопа жестко закреплен прицел. Вся приемо-передающая часть установлена на поворотном устройстве, которое выполнено вместе с раздвижной треногой, позволяю-

щей размещать устройство на горизонтальной площадке любого типа.

При дистанционном детектировании паров веществ на атмосферной трассе использовано рассеяние лазерного излучения на топографической мишени (рисунок 4).

Предварительные исследования показали возможность дистанционного выявления паров ацетона в атмосфере на расстоянии 30 метров при температуре ~ 20°C и влажности ~ 60% (рисунок 5).

Перед проведением трассовых экспериментов были проведены лабораторные измерения пропускания паров ДАТП и ТАТП с целью определения перспективности выявления данных веществ в трассовых экспериментах с использованием имеющегося оборудования. В измерениях использовался передающий канал макета и закрытая кювета (рисунок 6).

В ходе этих измерений пары ВВ напускались в вакуумированную абсорбционную кювету. После измерений кювета многократно прокачивалась воздухом и азотом и вновь вакуумировалась для следующих измерений. Колба с образцами ВВ контролируемо нагревалась или охлаждалась в климатической камере.

Результаты измерения пропускания паров ВВ приведены в таблице 1.

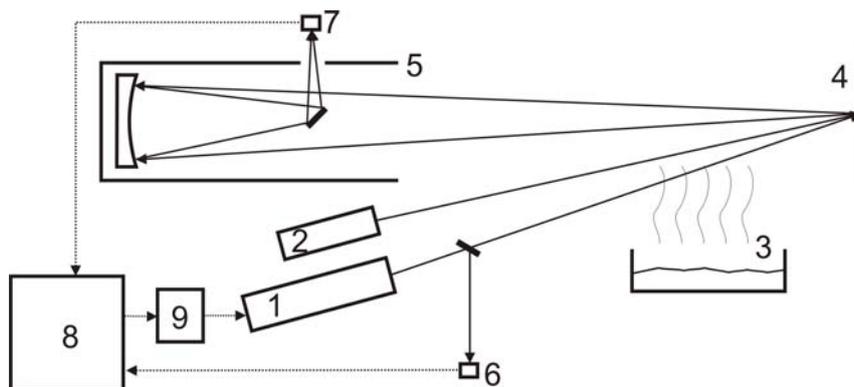
Пример временной зависимости пропускания кюветы приведён на рисунке 7.

Из приведенных данных следует, что натурные испытания на трассе целесообразно было проводить с парами ТАТП, т.к. они имеют наибольшее поглощение на длине волны излучения лазерного источника макета детектора.

Для трассовых измерений регистратор был установлен в помещении лаборатории, зондирование осуществлялось через открытое окно. На расстоянии 38 м от макета была установлена палатка, имеющая откидные двери. Внутри палатки располагались рассеиватель, исполняющий роль топомшени, и стол для размещения открытой кюветы (рисунок 8). Порошок ТАТП в количестве 20 г распределялся равномерно на дне кюветы.

Процедура измерений состояла из трех циклов. Сначала измерялся сигнал в отсутствии в палатке кюветы, затем измерялся сигнал при внесении кюветы и, наконец, после её удаления. Временная зависимость сигнала показана на рисунке 9.

САКОВИЧ Г.В., ЧЕРНОВ А.И., СИЛАНТЬЕВ С.В., ВОРОЖЦОВ А.Б., ПАВЛЕНКО А.А.,  
 МАКСИМЕНКО Е.В., МАКОГОН М.М., КЛИМКИН А.В., ОСИПОВ К.Ю., ПОНОМАРЕВ Ю.Н.,  
 КАПИТАНОВ В.А., АГЕЕВ Б.Г.



1 – CO<sub>2</sub>-лазер, 2 – красный диодный лазер для визуализации, 3 – кювета с ВВ, 4 – топомишень, 5 – приёмный телескоп, 6 – опорный фотоприёмник, 7 – сигнальный фотоприёмник, 8 – блок управления лазером, регистрации и обработки сигналов, 9 – задающий генератор.

Рисунок 4. Схема измерений

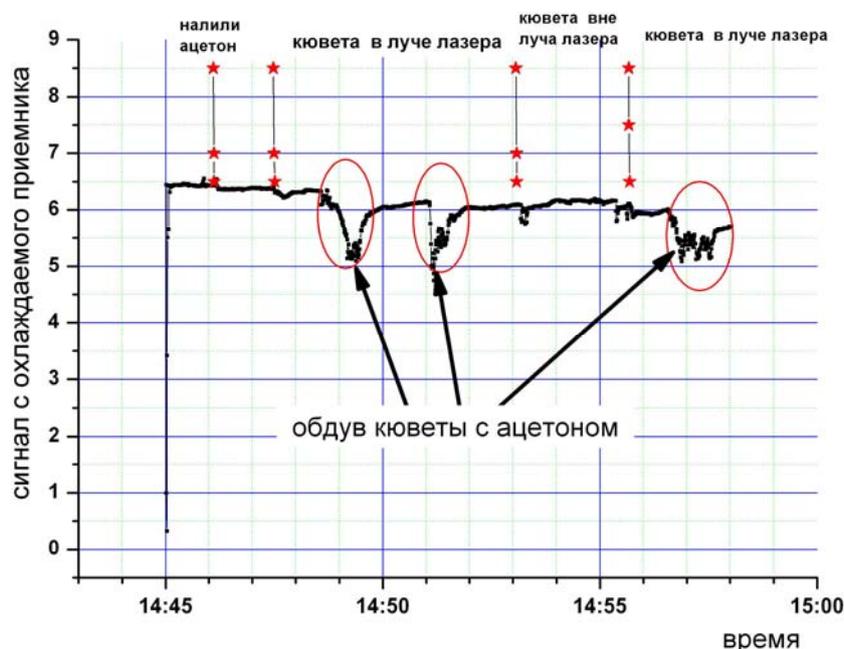
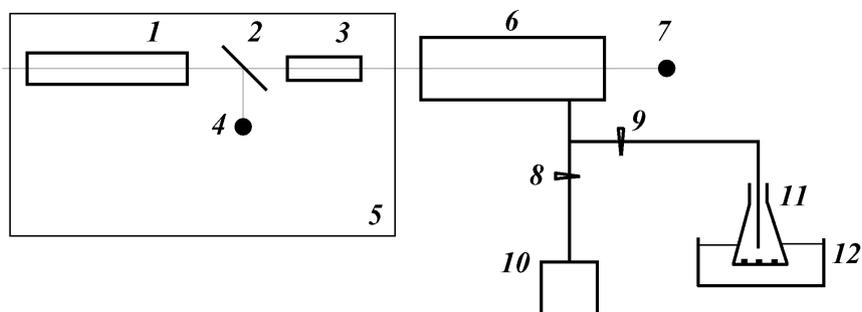


Рисунок 5. Поглощение лазерного излучения в атмосфере при прохождении через пары ацетона



1 – лазер; 2 – делительная пластинка; 3 – коллиматор; 4 – опорный приемник лазерного регистратора; 5 – макет лазерного регистратора; 6 – абсорбционная кювета; 7 – дополнительный измерительный пироприёмник МГ-30; 8, 9 – вакуумные краны; 10 – вакуумный насос; 11 – колба с образцом; 12 – емкость с водой с нагревателем

Рисунок 6. Схема расположения оборудования при измерении пропускания паров

МАКЕТ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ  
ИЗОТОПНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

Таблица 1

Результаты измерения пропускания паров ВВ

Вещество	Начальная температура, °С	Пропускание, %
ДАДП	21	99
ДАДП	55	94,2
ТАТП	минус 10	98,3
ТАТП	0	98
ТАТП	10	97
ТАТП	21	97,2
ТАТП	30	97,5
ТАТП	55	92

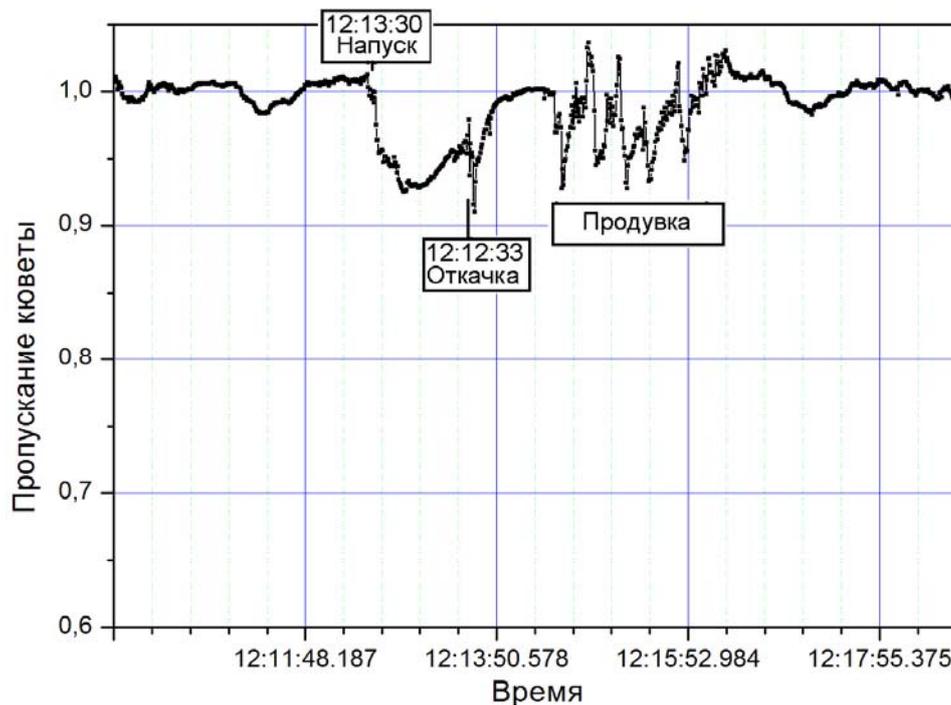


Рисунок 7. Временная зависимость пропускания абсорбционной кюветы при наполнении ее парами ТАТП

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЕТЕКТОРА**

Возможности дистанционного обнаружения объектов рассматриваемым методом дифференциального поглощения определяются тремя факторами: минимально регистрируемой величиной  $(\Delta I)/I_0$  ослабления лазерного излучения при зондировании облака паров (характеристикой аппаратуры), концентрацией паров (физико-химическими свойствами материала) и величиной дифференциального сечения поглощения  $\sigma$  (спектроскопическими свойствами материала).

Пороговое значение относительного поглощения  $(\Delta I)/I_0$  достигнуто при использовании диодных лазеров и составляет, как правило,  $10^{-4} \div 10^{-6}$ . Минимальное значение этой

величины ( $10^{-7}$ ) достигнуто в работах Надеждинского А.И. [4].

Температурная зависимость давления паров различных ВВ, в том числе ТАТП и ДАДП, показана в работе [5]. В результате обработки приведенных графиков получены аналитические зависимости давлений паров ТАТП и ДАДП (в мм рт. ст.) от температуры  $T$ , выраженной в градусах Кельвина,

$$P_{\text{ТАТП}} = \exp(-51.98103 + 0.23303 \cdot T - 2.2738E-4 \cdot T^2) \quad (2)$$

$$P_{\text{ДАДП}} = \exp(-59.26762 + 0.27381 \cdot T - 2.73259E-4 \cdot T^2) \quad (3)$$

Величину дифференциального сечения поглощения  $\sigma$  можно оценить по зарегистрированным спектрам. Считая для простоты поглощение вне аналитической линии равным нулю, получаем для длины волны 11,2 мкм сечения, равные  $9,31 \cdot 10^{-19}$  и  $3,85 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>/мол для ТАТП и ДАДП, соответственно.

САКОВИЧ Г.В., ЧЕРНОВ А.И., СИЛАНТЬЕВ С.В., ВОРОЖЦОВ А.Б., ПАВЛЕНКО А.А.,  
 МАКСИМЕНКО Е.В., МАКОГОН М.М., КЛИМКИН А.В., ОСИПОВ К.Ю., ПОНОМАРЕВ Ю.Н.,  
 КАПИТАНОВ В.А., АГЕЕВ Б.Г.

Полученные данные позволяют рассчитать величину ослабления лазерного излучения при зондировании паров ТАТП и ДАДП:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \exp(-\sigma \cdot c \cdot l), \quad (4)$$

где  $c$  – концентрация молекул в облачном ореоле ( $c [\text{см}^{-3}] = 2.68 \cdot 10^{19} / (763 \cdot P)$ ),

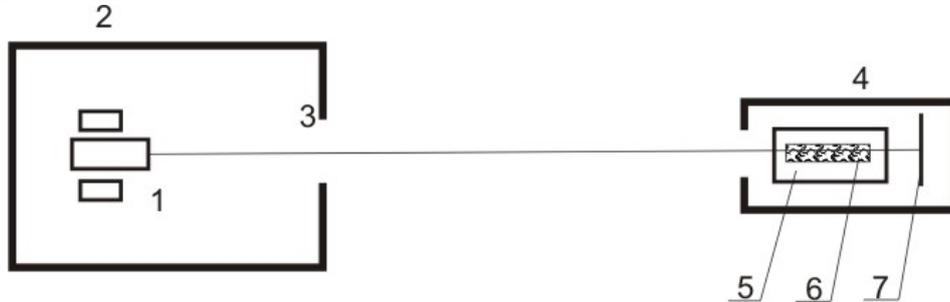
$l$  – длина ореола вдоль трассы зондирования.

Результаты расчета приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что как ТАТП, так и ДАДП могут быть обнаружены практически при любых температурах воздуха.

Величина рассчитанного по (4) ослабления не зависит от местоположения облачного

ореола вдоль трассы зондирования, необходимо только, естественно, чтобы он был между детектором и топографическим отражателем. И в этом смысле чувствительность детектора не зависит от расстояния до опасного объекта. Но возможность детектирования малой дифференциальной разности сигналов на двух длинах волн зависит от отношения  $\varepsilon$  мощности принимаемого сигнала к мощности шума фотодетектора и, соответственно, от расстояния до отражателя – чем это расстояние больше, тем большая величина  $(\Delta I)/I_0$  может быть зарегистрирована и тем меньше получается чувствительность детектора.



1 – лазерный регистратор с блоками питания и аппаратурой обработки и управления; 2 – рабочая лаборатория; 3 – окно лаборатории; 4 – палатка; 5 – стол; 6 – кювета 10×100 см; 7 – рассеиватель

Рисунок 8. Схема трассовых измерений

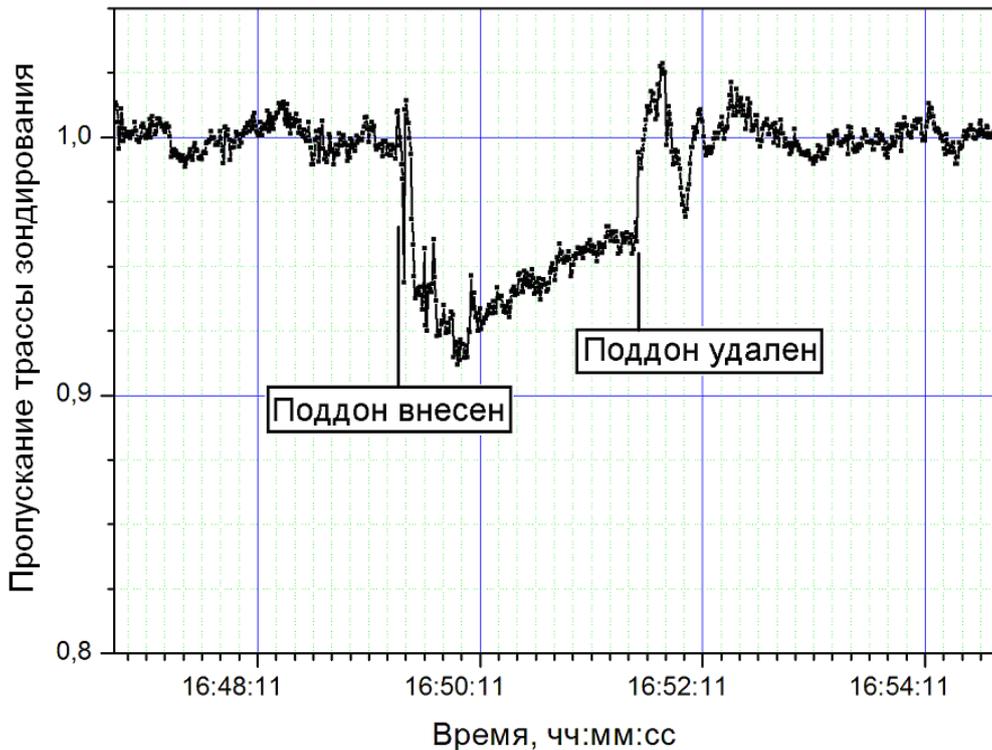


Рисунок 9. Временная зависимость пропускания трассы при внесении в палатку кюветы с ТАТП. Температура воздуха в палатке 26,6 градусов Цельсия

МАКЕТ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ  
ИЗОТОПНОГО CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

Таблица 2

Результаты расчета величины ослабления лазерного излучения

T, °C	T, °K	P <sub>ТАТП</sub> , мм рт. ст.	ΔI/I <sub>0</sub>		P <sub>ДАТП</sub> , мм рт. ст.	ΔI/I <sub>0</sub>	
			l=30 см	l=100 см		l=30 см	l=100 см
-20	253	5,11E-04	5,01E-04	0,00167	5,62E-04	2,28E-04	7,59E-04
-15	258	9,17E-04	8,99E-04	0,00299	0,0011	4,46E-04	0,00148
-10	263	0,00163	0,00159	0,0053	0,00212	8,59E-04	0,00286
-5	268	0,00285	0,00279	0,00928	0,00403	0,00164	0,00544
0	273	0,00494	0,00484	0,01603	0,00757	0,00307	0,01019
5	278	0,00847	0,00827	0,02731	0,01402	0,00567	0,01879
10	283	0,01435	0,01398	0,04583	0,02562	0,01034	0,03405
15	288	0,02404	0,0233	0,07559	0,04616	0,01855	0,06052
20	293	0,03981	0,0383	0,12207	0,08206	0,03274	0,10503
25	298	0,0652	0,06196	0,19201	0,14389	0,0567	0,17682
30	303	0,10556	0,09838	0,29192	0,24887	0,09603	0,28577
35	308	0,16898	0,15276	0,42454	0,42461	0,15824	0,43684
40	313	0,26745	0,23078	0,58296	0,71462	0,25167	0,61954
45	318	0,41851	0,33672	0,74552	1,18639	0,38202	0,79898
50	323	0,64748	0,47017	0,87965	1,94288	0,54534	0,92773

В режиме измерений, в котором регистрируются эхо-сигналы, диффузно отраженные от топографических объектов, мощность эхо-сигналов, детектируемых приемником лидара, описывается выражением [6]:

$$P_s = P \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{A}{R^2}\right) \cdot G \cdot T^2, \quad (5)$$

где  $R$  – расстояние до тополишени;  $P$  – мощность лазера;  $K_1, K_2$  – оптические эффективности передающего и приемного трактов;  $\rho$  – отражательная способность тополишени в единицу телесного угла;  $A$  – площадь апертуры приемника;  $G$  – геометрический фактор лидара;

$$T = \exp\left\{-\int_0^R [\alpha_g(\lambda, R) + \alpha_a(\lambda, R)] dR\right\} -$$

пропускание атмосферы на длине волны зондирования  $\lambda$ ,  $\alpha_g$  и  $\alpha_a$  – коэффициенты ослабления излучения из-за поглощения молекулярными газами и атмосферным аэрозолем, соответственно.

В ИК-области спектра основным ограничивающим фактором является дробовой шум детектора и согласно [6] отношение  $\varepsilon$  можно оценить из выражения:

$$\varepsilon = \frac{P_s}{\sqrt{\frac{2B(P_s + P_b) \cdot h\nu}{\eta} + B \cdot NEP^2}}, \quad (6)$$

где  $P_b = K_2 \cdot B_a \cdot A \cdot \Omega \cdot \Delta\lambda$  – мощность фонового излучения, падающая на детектор;

$B_a$  – яркость фонового излучения;  $\Omega = \pi\phi^2$  телесный угол зрения приемного тракта;  $\Delta\lambda$  – спектральная ширина полосы пропускания приемного тракта;  $B$  – ширина полосы пропускания усилителей приемного тракта;

$NEP = \frac{\sqrt{A}}{D^*}$  – эквивалентная мощность шума детектора;  $\eta$  – квантовая эффективность детектора;  $D^*$  – обнаружительная способность детектора.

Оценим  $\varepsilon$  для <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> лазера со средней выходной мощностью 2 Вт, периодом повторения импульсов излучения 1000 Гц, скважностью 10 и пиковой мощностью  $P = 20$  Вт. В расчетах примем следующие значения параметров приемно-передающего тракта:

$$K_1 = 0.7; K_2 = 0.88; A = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2; G = 0.5; \\ \Omega = 7.85 \cdot 10^{-5}; \\ B = 1 \cdot 10^4 \text{ Гц}; \Delta\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}; NEP = 3 \cdot 10^{-12} \\ \text{Вт/Гц}^{1/2}; \eta = 0.67 [7]$$

и приземного слоя стандартной атмосферы лета средних широт [8-11]:

$$\alpha_g = 0.227 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}; \alpha_a = 0.305 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}; B_a \\ = 1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}; \rho = 0.01 \text{ ср}.$$

На рисунке 10 представлены расчетные зависимости отношения сигнал/шум  $\varepsilon$  от расстояния  $R$  до тополишени. Зависимости построены для случая регистрации одиночных эхосигналов (кривая 1) и усредненных за 1 сек (1000 импульсов, кривая 2). На кривой 2 отмечено также, при каких температурах может быть зарегистрировано присутствие в атмосфере облачного ореола паров ТАТП протяженностью 100 см.

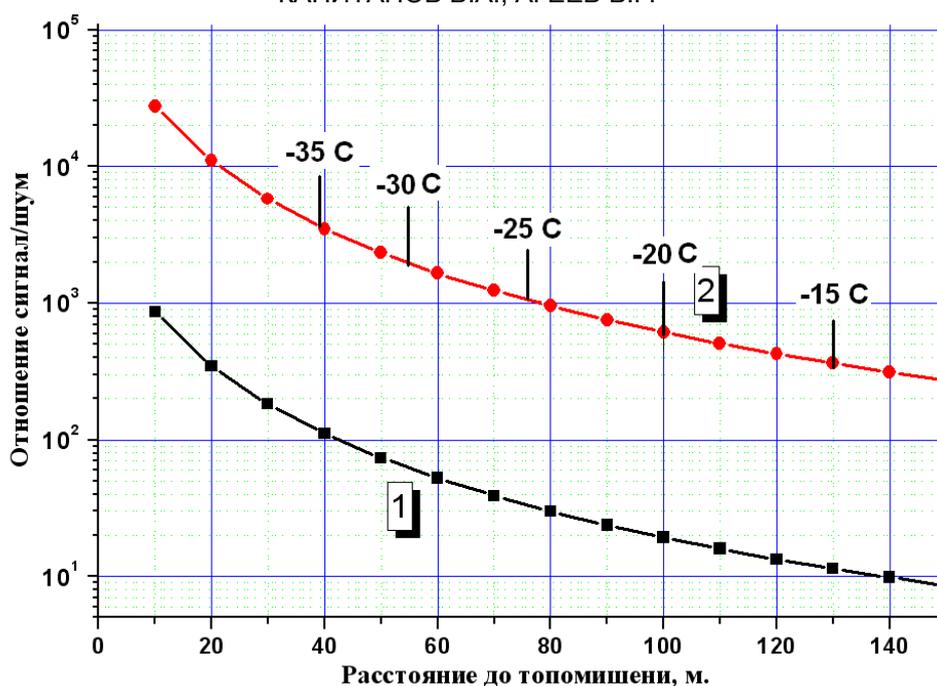


Рисунок 10. Зависимости отношения сигнал/шум  $\epsilon$  от расстояния  $R$  до тополищени. Регистрации одиночных экосигналов (кривая 1) и усредненных за 1 сек (1000 импульсов, кривая 2)

## ВЫВОДЫ

Проведённые работы показывают возможность применения метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии в ИК-диапазоне для обнаружения суррогатных ВВ на расстоянии порядка 100 метров и в широком диапазоне температур.

Однако использование только одного канала зондирования и регистрации не позволяет сделать прибор с высокой селективностью. Приведенные результаты и описанная установка являются промежуточным этапом по созданию аппаратно-программного комплекса для детектирования и распознавания суррогатных ВВ. При выполнении дальнейших работ будет увеличено число каналов регистрации поглощения (в диапазонах 3.4, 4.3, 8.3 и 11.2 мкм), что повысит селективность такого комплекса и увеличит число определяемых веществ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Air monitoring by spectroscopic techniques. / Ed. M.W.Sigrist. N.Y.: A Wiley – Interscience publication. – 1994. – 532 p.
2. [www.daylightsolutions.com](http://www.daylightsolutions.com)
3. [www.mgopticalsolutions.com](http://www.mgopticalsolutions.com)
4. <http://dls.nsc.gpi.ru/rus/sem/13/1.pdf>
5. Григорьев Г.Ю., Карапузиков А.И., Набиев Ш.Ш., Надеждинский А.И., Пономарев Ю.Н., Понуровский Я.Я., Юдин А.М. // Вопросы оборонной техники. Сер.16. Технические средства противодействия терроризму. – 2009. – Вып.1-2. – С.86-96.
6. Межерис Р. Лидарное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
7. <http://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/285/image/285-164.pdf>
8. Арефьев В.Н. // Квантовая электроника. – 1985. – Т.12. №3. – С.631-633.
9. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: изд-во Томского филиала СО АН СССР, 1986.
10. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов.радио, 1978. – 400 с.
11. Березовский В.В., Сплавник Ю.В. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1984. – Т.40, №5. – С.805-808.