

УДК 551.508.951+681.785.574

К. В. Глаголев, А. Н. Морозов,  
 Б. П. Назаренко, С. Е. Табалин,  
 О. В. Чубурков, С. И. Светличный,  
 С. П. Никитаев, А. В. Рожнов,  
 В. И. Филиппов, А. А. Григорьев

## **МОНИТОРИНГ ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРА**

*Обоснована теоретическая возможность наблюдения и регистрации спектра собственного излучения сред с помощью фурье-спектрорадиометра. Приводятся необходимые параметры спектрометра: рабочий диапазон, спектральное разрешение и время скана. Разработан и создан образец мобильного фурье-спектрорадиометра, на котором проведены натурные испытания. Даны оценки минимально обнаружимых концентраций для ряда экологически важных веществ.*

Для экологического мониторинга природных и техногенных катастроф, контроля технологических установок, утилизации производственных и бытовых отходов, транспортировки и хранения экологически опасных веществ широкое применение за последнее десятилетие получили оптические методики. Для большинства сложных органических загрязнителей типичны протяженные спектры с широкими полосами излучения или поглощения. Процедура распознавания отдельных веществ и определение их концентраций существенно усложняется при многокомпонентном загрязнении, когда полосы излучения (поглощения) индивидуальных веществ перемешиваются в спектрах. Эффективным способом получения наиболее полной и достоверной информации о состоянии и временной динамике процессов является регистрация полного оптического спектра исследуемой среды за минимально короткое время.

Высококчувствительный способ многокомпонентного анализа исследуемых сред по колебательно-вращательным спектрам молекул реализуется при использовании методик и аппаратных средств инфракрасной (ИК) фурье-спектроскопии благодаря ряду ее принципиальных достоинств [1, 2]:

— возможности организации методик наблюдения и регистрации спектров по их собственному излучению, обусловленной высокой светосилой интерферометров;

- широкому спектральному рабочему диапазону, ограниченному лишь спектральной чувствительностью фотоприемника и применяемыми оптическими материалами;
- одновременности и скорости регистрации всех спектральных компонентов исследуемой среды в рабочем диапазоне спектра;
- постоянству спектрального разрешения во всем рабочем спектральном диапазоне;
- высокой степени автоматизации измерений и диагностики состояний системы за счет применения ЭВМ;
- развитому метрологическому обеспечению в виде спектроскопических баз данных индивидуальных веществ, специально ориентированным программам обработки спектров и идентификации веществ.

Для решения задач экологического мониторинга атмосферы методами ИК фурье-спектроскопии принципиально могут быть использованы два основных способа контроля: активный и пассивный. Активная методика предполагает применение внешних источников излучения в качестве просвечивающих на трассах заданной протяженности и направления и приводит к последующему анализу получаемого спектра поглощения. Более широкими возможностями обладает пассивная методика наблюдения. Так, фурье-спектрорадиометр (ФСР) “пассивного” типа способен регистрировать собственное тепловое излучение различных подстилающих поверхностей: атмосферы, земли, зданий, растений, облаков, а также и произвольную спектральную комбинацию их потоков излучения и, что самое главное, собственное тепловое излучение газов загрязнителей.

Прямым способом получения информации о распределении и концентрациях молекул является сопоставление расчетного и экспериментального спектров, основанное на процедурах последовательного их приближения [3, 4]. Подобный алгоритм работоспособен и эффективен, но требует знания распределения плотности и температуры по трассе, а также базы спектроскопических данных по зависимостям сечений поглощений от волнового числа всех молекул (включая фоновые и загрязняющие вещества), составляющих трассу наблюдений, в том числе и зависимость сечений от температуры. Требуется также мощная вычислительная техника, чтобы обеспечить обработку данных в режиме реального времени.

Покажем, что для задач локального мониторинга можно вывести простое соотношение, связывающее экспериментально получаемые спектры облака загрязняющих веществ (испускания или поглощения). Пусть облако загрязняющих веществ (ЗВ) с характерным размером  $l$ , температурой  $T_1$  и коэффициентом пропускания

$$\tau_{3В} = \exp\left(-\sum_i \sigma_i n_i l\right) = e^{-D_1},$$

где  $\sigma_i$  и  $n_i$  — сечение поглощения и концентрация  $i$ -го компонента облака загрязняющих веществ,  $D_1$  — оптическая толщина, расположено на некотором расстоянии от входного зрачка фурье-спектрорадиометра. Пусть температура трассы равна  $T_2$ , а ее спектральный коэффициент пропускания —  $\tau_{тр} = e^{-D_2}$  (рис. 1). Наблюдаемый экспериментально спектр для подобной модели можно записать в виде следующего соотношения:

$$B(\nu) = \Phi_0 e^{-D_1} e^{-D_2} + P_1(1 - e^{-D_1})e^{-D_2} + P_2(1 - e^{-D_2}), \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  — спектр излучения подстилающей (за облаком ЗВ) поверхности,  $P_1(\nu, T_1)$ ,  $P_2(\nu, T_2)$  — расчетные функции Планка с температурами  $T_1$  и  $T_2$ .

Пусть далее мы имеем спектр той же трассы наблюдения, но при концентрации ЗВ, равной нулю, т. е. при оптической толщине  $D_1 = 0$ . Тогда

$$B_0(\nu) = \Phi_0 e^{-D_2} + P_2(1 - e^{-D_2}),$$

откуда получаем

$$\Phi_0 = \frac{B_0 - P_2(1 - e^{-D_2})}{e^{-D_2}}. \quad (2)$$

Подставив равенство (2) в соотношение (1), получим конечное выражение для определения коэффициента пропускания облака ЗВ:

$$\tau_{3В}(\nu) = e^{-D_1} = \exp\left(-\sum_i \sigma_i n_i l\right) = \frac{B - P_2 + \Delta P e^{-D_2}}{B_0 - P_2 + \Delta P e^{-D_2}}, \quad (3)$$

где  $\Delta P = P_1 - P_2$ . Даже для такой достаточно простой модели вычисление коэффициента пропускания представляет сложную итерационную



**Рис. 1. Упрощенная физическая модель пассивной методики регистрации спектров:**

$T_1$ ,  $T_2$  — усредненные температуры слоев воздуха

задачу, поскольку необходимо знание температуры трассы и облака ЗВ соответственно, а также и расстояния до облака ЗВ. Знание длины трассы необходимо для расчета ее спектрального коэффициента пропускания  $\tau_{ЗВ}$ . Если облако ЗВ имеет температуру, близкую или равную температуре трассы наблюдения, что характерно для приземных открытых трасс ( $T_1 \approx T_2$ ), то выражение (3) упростится и приобретет следующий вид:

$$\tau_{ЗВ}(\nu) = e^{-D_1} = \exp\left(-\sum_i \sigma_i n_i l\right) = \frac{B(\nu) - P(\nu, T)}{B_0(\nu) - P(\nu, T)}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что спектр поглощения или излучения  $B(\nu)$  возможно наблюдать лишь при наличии ненулевого яркостного контраста

$$\Delta B(\nu, T) = B_0(\nu) - P(\nu, T) \neq 0, \quad (5)$$

причем если  $\Delta B(\nu, T) > 0$ , то имеем спектр поглощения, а если  $\Delta B(\nu, T) < 0$  — спектр излучения облака ЗВ. Чтобы получить спектральную зависимость оптической плотности облака ЗВ, необходимо снять и обработать три спектра: спектр излучения трассы наблюдения с облаком загрязняющих веществ  $B(\nu)$ ; спектр “чистой” трассы  $B_0(\nu)$ , т. е. при концентрации ЗВ, равной нулю; предельный спектр — абсолютно черное тело (АЧТ), — соответствующий бесконечно большой концентрации ЗВ, когда подобный спектр описывается уже расчетной функцией Планка  $P(\nu, T)$ , если температура облака ЗВ известна.

Знание величины яркостного контраста трассы измерений позволяет рассчитать минимально регистрируемую концентрацию загрязняющего вещества. Пусть для определенности имеем положительную величину яркостного контраста  $B_0(\nu) \leq B(\nu) \leq P(\nu, T)$ , и пусть отношение сигнал/шум яркостного контраста разностного спектра  $\Delta B(\nu, T)$  равно  $\eta(\nu) = \Delta B(\nu)/\delta B$ , где  $\delta B$  — средний квадратичный уровень шума. Тогда, очевидно, величина минимально регистрируемой концентрации ЗВ по закону Бугера–Ламберта–Бера представляется в виде

$$\tau_{\min} = \exp(-\sigma n_{\min} l) = \frac{B_0(\nu) - \delta B - P(\nu, T)}{B_0(\nu) - P(\nu, T)} = \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)$$

или

$$D_{\min} = -\ln\left(1 - \frac{1}{\eta}\right).$$

При  $\eta \gg 1$ , разлагая функцию логарифма в ряд, получаем

$$D_{\min} = \sigma n_{\min} l \approx \frac{1}{\eta}. \quad (6)$$

Оценка максимально возможной измеряемой оптической толщины и концентрации ЗВ на трассе дает следующее соотношение:

$$D_{\max} = \sigma n_{\max} l = -\ln \left( \frac{B_0(\nu) - [P(\nu, T) + \delta B]}{B_0(\nu) - P(\nu, T)} \right) = \ln(\eta). \quad (7)$$

Пусть величины  $\delta B_0$  и  $\delta B$  равны:  $\delta B_0 = \delta B = \text{const}$ , и не коррелированы между собой, что физически оправдано для ИК диапазона спектра, где доминируют шумы фотоприемника. При выполнении условия постоянства ошибки можно показать, что ошибка измерения оптической толщины при заданном волновом числе  $\nu$  есть

$$\delta D = \sqrt{\left( \frac{\partial D}{\partial B} \delta B \right)^2 + \left( \frac{\partial D}{\partial B_0} \delta B_0 \right)^2} = \frac{1}{\eta} \sqrt{1 + e^{2D}}.$$

Деля это выражение на  $D$ , окончательно получаем формулу для определения относительной ошибки измерений оптических толщин:

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{1}{\eta} \frac{\sqrt{1 + e^{2D}}}{D}. \quad (8)$$

Из соотношений (6) и (7) следует, что для  $\eta = 100$  предельный динамический диапазон оптических толщин  $D$  занимает область от 0,01 до 4,61. При этом минимальная относительная ошибка измерений концентраций в спектрах поглощения (испускания) составляет величину около 3% при  $D \sim 1$ . Для  $D = 0,01$  относительная ошибка может достигать величин более 140%. Для диапазона изменений  $D \in [0,1, 4,6]$  относительная ошибка измерений не превышает 20%.

Спектральные свойства загрязняющих веществ — ширины их линий (полос) поглощения — задают необходимое спектральное разрешение  $\delta\nu$ , а их положение — рабочий диапазон. Для большинства загрязняющих веществ, важных в экологическом плане (фосфорорганические соединения и сложные органические вещества, включая циклические соединения), значение характерной ширины полос поглощения составляет не менее  $15 \text{ см}^{-1}$  [5, 6], поэтому необходимое спектральное разрешение на уровне нескольких обратных сантиметров оправдано.

Поскольку фурье-спектрометр предназначен для работы на открытых трассах длиной более сотен метров, то окна прозрачности атмосферы налагают естественные ограничения. Окно прозрачности атмосферы 7...13 мкм наиболее значимо для фурье-спектрометрии. Именно на него приходится максимум функции спектральной яркости

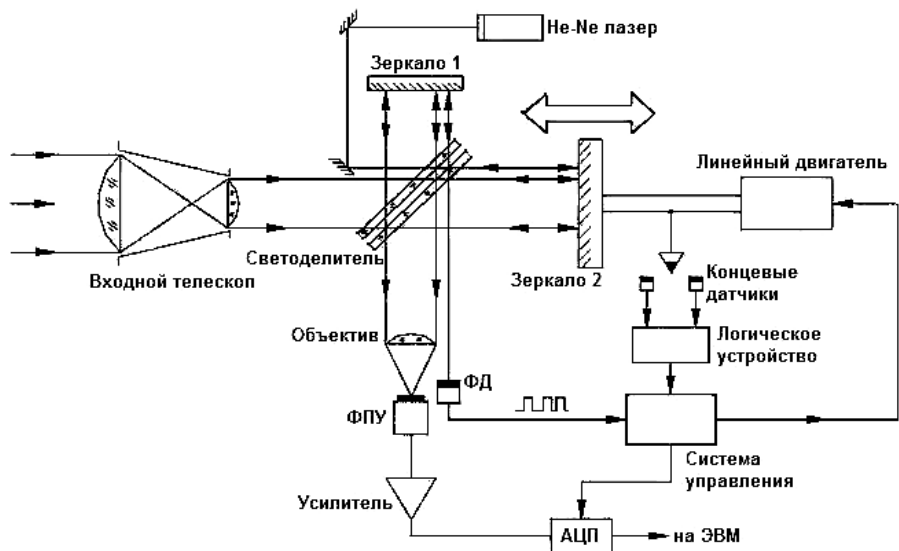
теплового излучения объектов. С учетом изложенного рабочий спектральный диапазон спектрорадиометра можно считать predeterminedным — это 7...13 мкм.

Важной характеристикой ФСР является его быстродействие, т. е. время скана (регистрации) интерферограммы, односторонней или двусторонней. При работе в натуральных условиях необходимо стремиться этот параметр сделать возможно минимальным. Однако он ограничивается частотными характеристиками и чувствительностью фотоприемного устройства, системой сканирования и предельной частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя. Существует параметр, называемый временем “замороженной” атмосферы, в течение которого физические, а следовательно, и оптические параметры атмосферы вдоль трассы наблюдения остаются практически неизменными. Для характерного размера зоны охвата  $10^2 \dots 10^3$  м усредненное значение этого параметра составляет около 0,1...0,3 с. Это означает, что время скана интерферограммы не должно превышать значения  $\tau_{\text{ск}} \leq 0,3$  с.

Для решения поставленной задачи в МГТУ им. Н.Э. Баумана в сотрудничестве с рядом институтов РАН проведен комплекс работ по исследованию, модельному конструированию и созданию образцов малогабаритных, мобильных фурье-спектрорадиометров среднего класса спектрального разрешения [7–11]. Разработанный к настоящему времени образец ФСР представляет собой классический интерферометр Майкельсона с периодической модуляцией разности хода в одном из его плеч (рис. 2). Все элементы ИК оптики изготавливались из германия или селенида цинка с широкополосными просветляющими интерференционными покрытиями. Опорное и подвижное зеркала ИК канала — плоские с золотым напылением. Источник опорного излучения референтного канала — одномодовый He–Ne лазер.

Линейный двигатель представляет собой конструкцию с постоянным кольцевым магнитом на основе материала Fe–Nd–В, намагниченным вдоль оси кольца, и электрическую катушку, жестко связанную с подвижной платформой. Подвес сканируемого зеркала выполнен на высокоточном пружинном параллелограмме, обеспечивающем смещение  $\pm 3$  мм зеркал от положения равновесия при точности сохранения его пространственного положения не более  $\pm 5$  угл. с. В качестве концевых датчиков перемещения служили магнитоуправляемые датчики Холла, располагаемые на неподвижной станине, а на подвижной платформе приклеивались миниатюрные постоянные магниты.

Фотоприемник ИК канала представляет собой охлаждаемый жидким азотом до 80 К фоторезистор на основе тройного соединения кадмий–ртуть–теллур (КРТ) с размером фоточувствительной площадки  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> и обнаружительной способностью  $D_{\lambda_{\text{max}}}^* \approx (1 \dots$



**Рис. 2. Блок-схема фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона**

$\dots 3) \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ . В целом, созданный ФСР конструктивно выполнен в виде четырех основных блоков: оптико-механического блока (ОМБ), двухступенной электромеханической системы наведения (СН) по азимуту и углу возвышения, блока управления и обработки (совместно с ЭВМ типа PC NoteBook) и геодезического штатива. Для наводки на цель и выбора трассы измерений ОМБ укомплектован высокочувствительным телевизионным визиром с трансфокаторным объективом. Питание ФСР осуществляется от сети  $\sim 220 \text{ В}$  или через преобразователь от аккумуляторной батареи. Суммарная потребляемая мощность не превышает  $50 \text{ Вт}$ . Технические характеристики ФСР составляют:

- 1) спектральный диапазон  $750 \dots 1500 \text{ см}^{-1}$ ;
- 2) разрешение не хуже  $4 \text{ см}^{-1}$ ;
- 3) мгновенное поле зрения  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ ;
- 4) кратность входного телескопа 2;
- 5) частота сканирования не менее 3 сканов/с;
- 6) интерферограмма двусторонняя ( $\sim 8000$  точек);
- 7) аналого-цифровой преобразователь 12...16 бит ( $100 \dots 500 \text{ КГц}$ );
- 8) масса ОМБ и СН 20 кг.

*Процедура обработки исходных интерферограмм и спектров* включает в себя два последовательных этапа [12, 13]:

— фазовую коррекцию, необходимость которой диктуется наличием собственного фонового (приборного) излучения, поступающего в

интерферометр со стороны ФПУ, в результате чего фазовая составляющая может претерпеть скачки на  $\pi$  рад и привести к инверсии линий (полос или участков) в конечном спектре;

— учет фоновой составляющей.

Для очистки исходных спектров от фоновой составляющей необходимо знание двух функций: спектральной чувствительности ФСР и эффективной степени черноты фонового источника при известной температуре деталей интерферометра. Они находились из измерений, проведенных для эталонных ИК источников излучения, и вариации собственной температуры интерферометра.

Далее проводилась финишная обработка спектров, вызванная непостоянством их положения, малыми температурными контрастами и, как следствие, пересечением фоновых и экспериментальных спектров. Задача данного этапа обработки состоит в том, чтобы выстроить спектры по ранжиру, согласно которому спектры облака загрязнителей  $B(\nu)$ , трассы без облака загрязняющих веществ  $B_0(\nu)$  и планковская функция  $P(\nu, T)$  должны удовлетворять соотношению  $B_0 \leq B \leq P$  либо  $P \leq B \leq B_0$  для каждого волнового числа. Если спектры фона и функции Планка не удовлетворяли этим критериям, то спектр фона подстраивался, при этом он представлялся параметрически:

$$\bar{B}_0(a, b, \nu) = (a + b\nu)B_0(\nu),$$

где  $B_0(\nu)$  — первоначально измеренный спектр. Константы  $a, b$  выбирались из следующих соображений: спектр фона должен лежать выше (или ниже) спектра сигнала; на краях спектрального участка спектры сигнала и фона не должны отличаться.

Для идентификации и определения концентраций предварительно рассчитывались корреляции спектров веществ из базы данных и спектра падающего излучения, т. е. определялось вещество, обладающее максимальным коэффициентом корреляции. При наличии нескольких веществ в облаке ЗВ корреляции более слабых примесей могут быть сильно искажены основным веществом, поэтому проводилась процедура исключения первого найденного вещества из исходного спектра. После этого коэффициенты корреляции всех оставшихся веществ пересчитывались заново и процедура исключения повторялась для второго, третьего и т. д. Таким образом, для количественного анализа оставалось заданное число веществ  $M$ .

Расчет концентраций велся с применением процедуры оптимизации по минимуму квадрата: после отбора  $M$  веществ проводился количественный анализ, т. е. минимизировалась функция невязки вида

$$\Phi(c_1, \dots, c_M) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \left[ \exp \left( - \sum_{m=1}^M c_m D_m(\nu) \right) - \tau(\nu) \right]^2 w(\nu) d\nu,$$

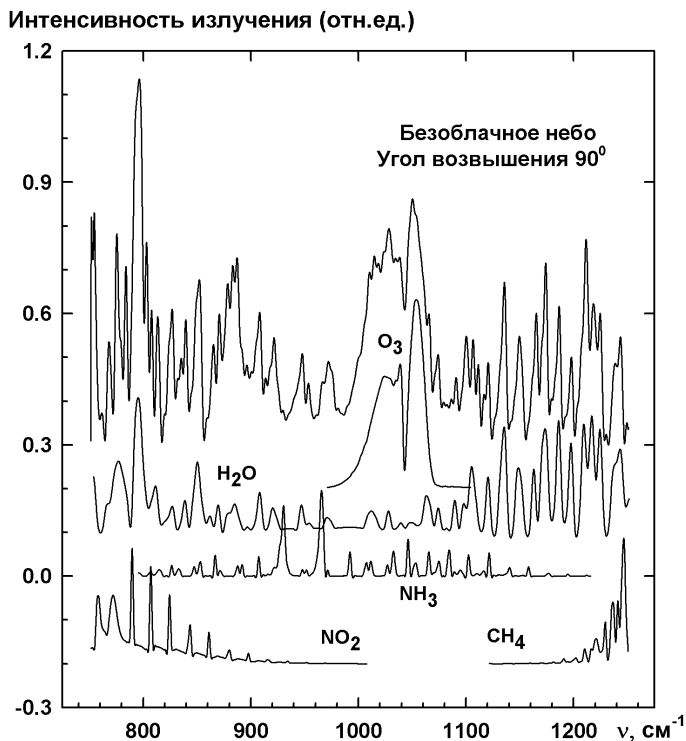


где  $c_m$  — весовые множители веществ базы данных;  $\tau(\nu)$  — коэффициент пропускания;  $w(\nu)$  — весовая функция, отражающая погрешность определения коэффициента пропускания. Минимизация нелинейного функционала велась с учетом неотрицательности величин концентраций, т. е. для  $c_i \geq 0$ .

Тестовые лабораторные проверки ФСР проводились с учетом особенностей его эксплуатации в полевых условиях. При лабораторных проверках фурье-спектрометра определяли его основные технические характеристики (рабочий диапазон, спектральное разрешение) в соответствии с ГОСТ 8.229–81. При натурных испытаниях сначала исследовалась эффективность открытых трасс наблюдений. Они проводились в условиях города Москвы и Московской области как в дневное, так и в ночное время суток [14]. Условия проведения эксперимента — ясное безоблачное небо или сплошная низкая облачность с высотой кромки облаков около 500...600 м. Температура воздуха в этот период варьировалась от 0 до +27°C, влажность — от 60 до 90%, скорость ветра — от слабого до 15...20 м/с.

В качестве опорных источников излучения исследовались следующие подстилающие поверхности (ПП): ясное безоблачное небо при углах возвышения от +6 до +90°, сплошная низкая облачность, а также нагретые солнцем поверхности различных топографических объектов (ТО): стены домов, строительные вагончики, автомобильные дороги, площадки и т. п. Периодические проверки правильности и стабильности функционирования фурье-спектрометра проводились на тестовых объектах — пленках полистирола, лавсана и фторопласта. Полученные спектральные зависимости коэффициента пропускания сравнивались с аналогичными эталонными спектрами, снятыми на поверенном заводском фурье-спектрометре. Вычисленные таким образом значения коэффициентов корреляции  $r$  экспериментально зарегистрированных и эталонных спектров составили величины от 0,8 до 0,99, в зависимости от величины яркостного контраста трассы, что прямо указывает на высокую степень достоверности экспериментальных спектров тестовых имитаторов и правильность функционирования программного обеспечения фурье-спектрометра в целом.

Была осуществлена идентификация линий и полос излучения в диапазоне 700...1500 см<sup>-1</sup> спектра безоблачного неба при наблюдении его в зенит. На рис. 3 представлен модифицированный спектр излучения безоблачного неба, где для большей наглядности из экспериментального спектра убрана постоянная составляющая. Под экспериментальным спектром приведены спектральные зависимости оптической плотности для ряда газов, составляющих основу стандартной атмосферы. Видно, что основными излучателями являются пары воды (H<sub>2</sub>O), озон (O<sub>3</sub>) и



**Рис. 3. Модифицированный экспериментальный спектр излучения безоблачного неба**

аммиак ( $\text{NH}_3$ ), а на краях рабочего диапазона отчетливо проявляются наиболее сильные полосы свечения двуокси азота ( $\text{NO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ).

Как показали результаты экспериментов и анализ данных, приведенных в работе [15], наиболее эффективны трассы наблюдения облака ЗВ на фоне безоблачного неба в качестве подстилающей поверхности. Яркостный контраст при  $\nu \approx 1060 \text{ см}^{-1}$  для угла возвышения  $90^\circ$  и температуре приземного слоя воздуха  $+12^\circ\text{C}$  составляет около  $\Delta T \approx 40^\circ\text{C}$  (для зимних условий наблюдения эта величина будет даже несколько больше). По мере снижения угла наблюдения яркостный контраст, естественно, уменьшается из-за увеличения толщины воздушной массы.

Для облачного неба и наблюдении в зенит спектр излучения близок к излучению АЧТ в диапазоне  $800 \dots 1200 \text{ см}^{-1}$  с температурой  $+10 \dots \dots +11^\circ\text{C}$  при температуре приземного слоя воздуха  $T = +14^\circ\text{C}$ . В день наблюдения высота нижней кромки облаков составляла величину около  $h \sim 500 \dots 600 \text{ м}$ , поэтому, зная поведение температуры  $T_h = T - h\beta$ , где  $\beta = 6 \text{ К/км}$  — градиент падения температуры в зависимости от высоты, мы легко вычисляем температуру нижней кромки облаков, а следовательно, и яркостную температуру ПП.

Для спектра топографического объекта (строительный вагончик, нагреваемый солнцем) ситуация во многом аналогична: спектр излучения непрерывен и близок по своим параметрам к спектру АЧТ с температурой  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температуре воздуха  $T = +21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этом случае яркостный контраст зависит от времени суток наблюдения, сезона, угла падения солнечных лучей на поверхность ТО, состояния облачности, направления и силы ветра. Если в случае облачного неба мы имели отрицательный яркостный контраст  $\Delta T = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и, как следствие, наблюдения спектров излучения ЗВ, то в данном случае ситуация обратная: яркостный контраст  $\Delta T = +8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  положителен и в эксперименте регистрируются спектры поглощения.

С целью проверки правильности алгоритма распознавания веществ перед выездом на полевые испытания проводилось лабораторное тестирование фурье-спектрометра с использованием статической камеры, имеющей длину оптического пути, равную 8 м. После ввода в статическую камеру заданного количества паров вещества (или смеси веществ, концентрации которых варьировались) контролировался момент обнаружения, правильность идентификации вещества (и/или компонентов смеси) и определялись концентрации обнаруженных компонентов. При испытаниях на статической камере регистрировались предельные минимально обнаружимые концентрации как отдельных веществ (см. табл. 1), так и смесей типа метанол–аммиак и метанол–аммиак–ацетон. Во всех проведенных экспериментах правильно идентифицировались все компоненты смесей с определением их концентраций при яркостном контрасте, не превышающем 5...7 К.

Полевой этап испытаний ФСР начинался ранним утром в условиях минимальных яркостных контрастов трасс [16, 17] и продолжался до полудня, когда яркостные контрасты приземных трасс были максимальны. Мишенная обстановка создавалась с помощью специальной метательной машины с последующим принудительным распылом в воздухе вещества на высотах, не превышающих  $\sim 50$  м. Квант распыла составлял около 0,4 л при максимальном числе квантов 36. Испытания проводились на дистанциях до места распыла от 0,3 до 6 км. Угол возвышения для всех трасс наблюдений не превышал  $\pm 7^{\circ}$  по отношению к горизонту.

Тестирование работы фурье-спектрометра проводилось в двух режимах: срабатывания по первому факту обнаружения или по перманентной (непрерывной) записи результатов работы в файл. В обоих режимах на дисплее всегда отображалась информация работы ФСР: наименование обнаруженного вещества, его интегральная концентрация, коэффициент корреляции, координаты трассы и текущее время. Кроме того, в отдельном секторе дисплея в режиме реального времени всегда присутствовала телевизионная картинка.

**Минимально обнаружимые концентрации веществ**

№	Вещество	Минимально обнаружимая интегральная концентрация, г·К/м <sup>2</sup>	Минимально обнаружимая концентрация при размере облака $L \sim 100$ м, г/м <sup>3</sup> . Температурный контраст $\sim 5$ К
1	Несимметричный диметилгидразин (НДМГ)	0,3	$6 \cdot 10^{-4}$
2	Метанол	0,1	$2 \cdot 10^{-4}$
3	Аммиак	0,05	$1 \cdot 10^{-4}$
4	Ацетон	0,75	$1,5 \cdot 10^{-3}$
5	Фенол	1,0	$2 \cdot 10^{-3}$
6	Бензол	1,5	$3 \cdot 10^{-3}$
7	Толуол	4,0	$8 \cdot 10^{-3}$
8	<i>o</i> -ксилол	5,0	$1 \cdot 10^{-2}$
9	<i>m</i> -ксилол	5,0	$1 \cdot 10^{-2}$
10	1,2-дихлорэтан	5,0	$1 \cdot 10^{-2}$

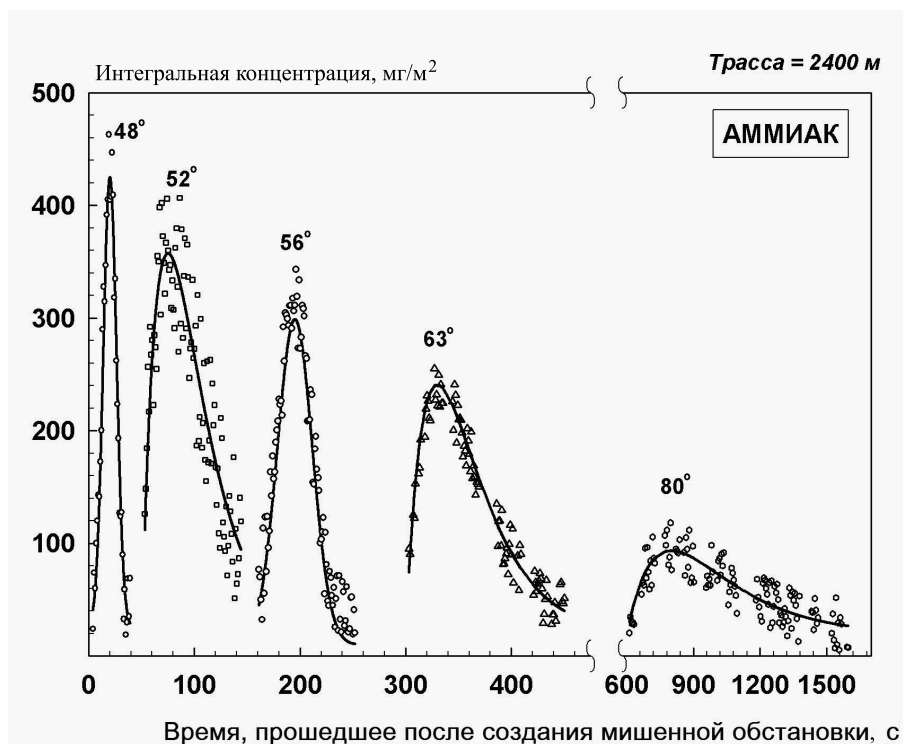
В режиме сканирования одного или нескольких секторов на дистанциях 0,5, 1,0 и 2,4 км зафиксировано надежное обнаружение паров аммиака, при котором прибор прекращал работу, переходил в режим ожидания последующих команд и выдавал информацию о результатах распознавания. На рис. 4 приведены данные перманентной записи данных в файл по обнаружению облака паров аммиака на трассе длиной 500 м при одиночном заряде аммиака массой 80...90 г (0,45 л 20%-ного раствора аммиачной воды). Наблюдения облака велись при неизменных углах возвышения и места (статичная трасса).

На этой же трассе успешно проведены серии экспериментов по обнаружению смесей паров метилового, этилового и изопропилового спиртов, ацетона и аммиака в их различных комбинациях и с разными величинами концентраций.

На рис. 5 приведен результат наблюдения и фиксации параметров облака паров аммиака на трассе 2,4 км при разовом распыле  $\sim 0,7$  кг аммиачной воды. Направление движения облака относительно трассы наблюдения изменялось по мере движения облака от 90 до 40°. Наблюдение велось более 40 мин непрерывно в режиме ручного сопровождения облака. При этом суть методики заключалась в выставлении фиксированных значений азимута (его значения указаны на графиках) и регистрации изменения концентрации по мере прохождения облака мимо поля зрения ФСР. На рис. 5 хорошо просматривается увеличение разме-



**Рис. 4.** График перманентной записи данных в файл по обнаружению облака паров аммиака на трассе длиной 500 м при одиночном заряде аммиака массой 80...90 г



**Рис. 5.** Результаты наблюдения и фиксации параметров облака паров аммиака (NH<sub>3</sub>) на трассе длиной 2,4 км

ра облака при уменьшении интегральной концентрации аммиака в нем по мере его движения.

Работа на трассах различной протяженности позволила определить минимально регистрируемые концентрации паров аммиака. Результа-

ты экспериментов сведены в табл. 2, там же приведены и усредненные яркостные контрасты трасс, которые определялись с помощью панорамного тепловизора на диапазон 7...12 мкм с точностью определения яркостных температур около 0,1 К.

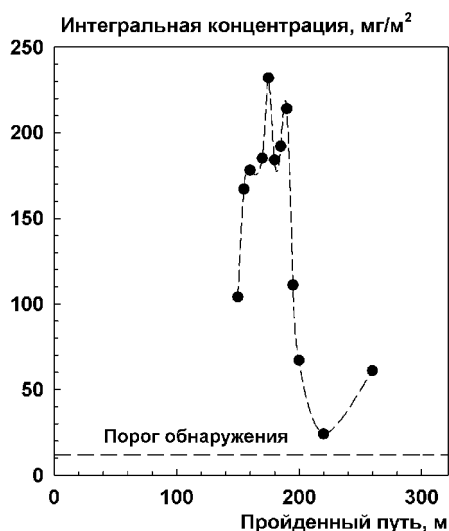
Таблица 2

**Минимально обнаружимые концентрации паров аммиака в зависимости от длины трассы**

Длина трассы, км	Оценка минимально обнаружимой концентрации, мг/м <sup>2</sup>	Температурный контраст трассы, К
0,45–0,5	7–15	5–6
1,0	10–20	3–4
1,5	22–25	2–4
2,5	27–30	2–3
4,0	17–20	2–3
6,0	25–30	1–2

В рамках полевых испытаний было проведено тестирование работы фурье-спектрометра при его размещении на легковом автомобиле и движении последнего со средней скоростью около 10 м/с по проселочной грунтовой дороге. В 300...400 м от дороги на высоте ~ 50 м при скорости ветра менее 1 м/с распылялся аммиак в количестве ~ 0,2 кг. Через 0,5 минуты после создания мишенной обстановки начиналось движение автомобиля с включенным фурье-спектрометром. Угол между вектором наблюдения ФСР и курсом автомобиля был неизменен и составлял около 90°. На рис. 6 представлены результаты измерений концентраций аммиака при движении автомобиля с установленным на нем фурье-спектрометром.

Полученные экспериментальные результаты и опыт работы в течение ряда лет подтверждают перспективность применения фурье-



**Рис. 6. Результаты обнаружения, идентификации и определения концентраций облака аммиака при работе фурье-спектрометра на мобильном средстве в движении**

спектрорадиометра для решения задач оперативного контроля состава воздушной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 382 с.
2. Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения: Сб. статей / Под ред. Г.Н. Жижина. – М.: Мир, 1972. – 352 с.
3. Veil A., Daum R., Matz G. et al. Remote sensing of atmospheric pollutants by passive FTIR spectrometry // Proc. of SPIE. – 1998. – V. 3493. – P. 32–43.
4. Heland J., Schaffer K. Analysis of aircraft exhaust with Fourier-transform infrared emission spectroscopy // Appl. Optics. – 1997. – V. 36. – P. 4922–4931.
5. Сильверстейн Р., Басслер Г., Морил Т. Спектрометрическая идентификация органических соединений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 590 с.
6. Hoffland L., Piffath R., Bouk J. Spectral signature of chemical agents and simulants // Optical Engineering. – 1985. – V. 24, № 6. – P. 982–984.
7. Дроздов М. С., Ивлев О. А., Кочкиков И. В., Морозов А. Н и др. Дистанционный газовый анализ атмосферы при помощи пассивного фурье-спектрометра // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – № 1. – С. 28–40.
8. Горчаковский С. Н., Дроздов М. С., Ивлев О. А., Кочкиков И. В и др. Дистанционный газовый анализ атмосферы при помощи пассивного фурье-спектрометра. Конструкция и тестовые испытания // Изв. РАН. Энергетика. – 1999. – № 2. – С. 111–119.
9. Горчаковский С. Н., Ивлев О. А., Кочкиков И. В., Мазничко А. А и др. Малогабаритный фурье-спектрометр для дистанционного анализа газовых сред // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65, № 6. – С. 86–89.
10. Дворук С. К., Морозов А. Н., Павлов Д. А., Поздняков В. А. и др. Система сканирования интерферометра Майкельсона на основе линейного двигателя с постоянным магнитом // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 3. – С. 146–150.
11. Дворук С. К., Морозов А. Н., Павлов Д. А., Поздняков В. А и др. Система сканирования фурье-спектрометра среднего разрешения // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – № 6. – С. 119–124.
12. Дворук С. К., Корниенко В. Н., Кочкиков И. В., Лельков М. В. и др. Обработка двусторонних интерферограмм с учетом собственного фонового излучения фурье-спектрорадиометра // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93, № 5. – С. 884–889.
13. Дворук С. К., Ефимов И. Н., Корниенко В. Н., Кочкиков И. В и др. Влияние собственного фонового излучения на работу фурье-спектрорадиометра // Оптический журнал. – 2003. – Т. 70, № 5. – С. 20–24.
14. Дворук С. К., Кочкиков И. В., Морозов А. Н., Назолин А. Л. и др. Применение фурье-спектрорадиометра для определения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67, № 3. – С. 37–42.
15. Shimoto A., Kobayashi H., Kadokura S. Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator // Appl. Opt. – 1999. – V. 38. – P. 571–576.

16. Бойко А. Ю., Григорьев А. А., Дворук С. К., Корниенко В. Н. и др. Проблема идентификации и определения концентраций загрязняющих веществ с помощью фурье-спектрорадиометра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Естественные науки”. – 2004. – № 1. – С. 26–41.
17. Дворук С. К., Корниенко В. Н., Кочиков И. В., Лельков М. В. и др. Мониторинг загрязняющих веществ в атмосфере с помощью фурье-спектрорадиометра // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 5. – С. 7–13.

Статья поступила в редакцию 20.04.2005



Константин Владимирович Глаголев родился в 1956 г., окончил в 1980 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области люминесцентной спектроскопии и оптики рассеивающих сред.

K.V. Glagolev (b. 1956) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1980. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of luminescent spectroscopy and optics of scattering media.



Андрей Николаевич Морозов родился в 1959 г., окончил в 1981 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области прецизионных измерений и физической кинетики.

A.N. Morozov (b. 1959) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. D. Sc. (Phys.-Math.), professor, head of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of high precision measuring and physical kinetics.



Борис Петрович Назаренко родился в 1943 г., окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теоретическая механика”, руководитель научно-учебного комплекса “Фундаментальные науки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области движения транспортных машин.

B.P. Nazarenko (b. 1943) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Theoretical Mechanics” department, chief of “Fundamental Sciences” scientific and educational complex of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of motion of transport vehicles.

Сергей Егорович Табалин родился в 1961 г., окончил в 1984 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ ПММ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области физической оптики и прецизионных измерений.

S.Ye. Tabalin (b. 1961) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1984. Researcher of “PMM” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 publications in the field of physical optics and high precision measuring.



Олег Валентинович Чубурков родился в 1960 г., окончил в 1983 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Заместитель начальника военного факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области информационных технологий.

O.V. Chuburkov (b. 1960) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Deputy chief of the Military Faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of information technologies.

Сергей Иванович Светличный родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МФТИ. Канд. физ.-мат. наук, директор филиала Института энергетических проблем химической физики РАН. Автор более 50 научных работ в области химической физики, спектроскопии.

S.I. Svetlichnyi (b. 1950) graduated from the Moscow Institute for Physics and Technology in 1973. Ph. D. (Phys.-Math.), director of the Branch of Institute for Energy Problems in Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 50 publications in the field of chemical physics and spectroscopy.

Сергей Павлович Никитаев родился в 1960 г., окончил в 1983 г. Саратовское военное высшее инженерное училище химической защиты. Д-р техн. наук, старший научный сотрудник, председатель Военно-научного комитета Управления начальника войск радиационной, химической, биологической защиты Вооруженных сил РФ. Автор более 180 научных работ в области разработки средств радиационной, химической и биологической защиты.

S.P. Nikitaev (b. 1960) graduated from the Saratov Military Higher Engineering School for Chemical Defense in 1983. D. Sc. (Eng.), senior researcher, chairman of Military Scientific Committee for Radiation, Chemical and Biological Defense of the RF Armed Forces. Author of more than 180 publications in the field of radiation, chemical and biological defense.

Александр Владимирович Рожнов родился в 1957 г., окончил в 1990 г. Военную академию химической защиты. Начальник группы Военно-научного комитета Управления начальника войск радиационной, химической, биологической защиты Вооруженных сил РФ. Специализируется в области разработки средств радиационной, химической и биологической защиты.

A.V. Rozhnov (b. 1957) graduated from the Military Academy for Chemical Defense in 1990. Head of group of Military Scientific Committee for Radiation, Chemical and Biological Defense of the RF Armed Forces. Specializes in the field of radiation, chemical and biological defense.

Владимир Иванович Филиппов родился в 1955 г., окончил в 1990 г. Военную академию Генерального штаба. Начальник войск радиационной, химической, биологической защиты Вооруженных сил РФ. Специализируется в области разработки средств радиационной, химической и биологической защиты.

V.I. Filippov (b. 1955) graduated from the Military Academy of General Headquarters in 1990. Chief of forces for Radiation, Chemical and Biological Defense of the RF Armed Forces. Specializes in the field of radiation, chemical and biological defense.

Александр Александрович Григорьев родился в 1951 г., окончил в 1975 г. Военную академию химической защиты. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Центрального научно-исследовательского испытательного института. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования, спектроскопии и оптической локации.

A.A. Grigoriev (b. 1951) graduated from the Military Academy for Chemical Defense in 1975. Ph. D. (Eng.), senior researcher, head of department of Central Institute for Research and Testing. Author of more than 100 publications in the field of mathematical simulation, spectroscopy and laser location.