

А. Ю. Б о й к о, А. А. Г р и г о р ь е в, Г. В. М а ц ю к,  
А. Ю. П а в л о в, П. Е. Ш л ы г и н (Центральный  
научно-исследовательский испытательный институт),  
С. К. Д в о р у к, М. В. Л е л ь к о в, А. Н. М о р о з о в,  
С. Е. Т а б а л и н, Г. В. Ш и ш к и н (МГТУ им. Н.Э. Бау-  
мана), В. Н. К о р н и е н к о (ИРЭ РАН), И. В. К о ч и к о в  
(НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова), С. И. С в е т л и ч -  
н ы й (Институт энергетических проблем химической  
физики РАН)

## **ПРОБЛЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРА**

*На основе модели постоянства температур трассы и облака загрязняющих веществ предложен алгоритм решения задачи идентификации и определения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере с помощью фурье-спектрорадиометра среднего класса разрешения. Рассмотрены процедуры обработки исходных интерферограмм и экспериментальных спектров, в том числе при малых яркостных контрастах трасс. Приведены экспериментальные результаты лабораторных и натуральных испытаний фурье-спектрорадиометра.*

Для лабораторных условий и стационарных фурье-спектрометров задача идентификации и определения концентрации веществ является методологически проработанной. Существует отлаженное программное обеспечение для решения подобных задач, включающее в себя набор математических процедур, позволяющих из экспериментального спектра выделить искомые спектральные компоненты и определить концентрации исследуемого вещества. Более того, имеются базы спектральных данных (постоянно пополняющиеся), с помощью которых решение задачи идентификации вещества, как правило, существенно упрощается. Естественно, что проведение подобных процедур требует достаточно высокой квалификации исследователя и занимает значительное время. Для мобильных фурье-спектрорадиометров (ФСР), предназначенных для работы в естественных условиях и в реальном масштабе времени, поставленная задача намного сложнее. Это обусловлено особенностями экспресс-анализа, жесткими временными рамками обработки и выдачи конечных результатов, а также непостоянством мишенной обстановки — вариациями температур подстилающей поверхности, изменением концентраций облаков загрязняющих веществ во времени и пространстве и т.п.

Цель настоящей работы — демонстрация одного из возможных алгоритмов работы ФСР в реальном масштабе времени на основе накопленного опыта эксплуатации мобильного ФСР со спектральным разрешением около  $4 \text{ см}^{-1}$ , рабочим диапазоном  $700 \dots 1400 \text{ см}^{-1}$ , временем скана менее  $0,4 \text{ с}$  и мгновенным полем зрения  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ . Фотоприемное устройство — фотоспротивление Cd-Hg-Te, охлаждаемое до  $80 \text{ К}$ , с обнаружительной способностью около  $D^* = 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ . ФСР снабжен электромеханической системой сканирования и высокочувствительным телевизионным визиром [1, 2].

### Основные соотношения, используемые при обработке спектров.

При обработке спектров собственного излучения объектов в атмосфере можно исходить из наиболее общего уравнения переноса излучения, но для его решения, даже приближенного, требуются значительные вычислительные ресурсы, знание метеобстановки, привлечение специфических баз данных по излучательным свойствам подстилающих поверхностей и спектральным коэффициентам поглощения трасс. Поставленную задачу можно упростить, если предположить, что температуры облака загрязняющих веществ и трассы постоянны. Это предположение оправдано для приземных трасс наблюдений, где температурные перепады вдоль трассы не превышают нескольких градусов. Отсюда легко получить выражение для наблюдаемого спектра:

$$B = P - \tau_{\text{тр}}\tau_{\text{ЗВ}}(B_0^* - P), \quad (1)$$

где  $B = B(\nu)$  — экспериментальный спектр;  $P = P(\nu, T)$  — функция Планка;  $B_0^* = B_0^*(\nu)$  — спектр подстилающей поверхности (находящейся за облаком загрязняющих веществ по отношению к ФСР);  $\tau_{\text{тр}} = \tau_{\text{тр}}(\nu)$  и  $\tau_{\text{ЗВ}} = \tau_{\text{ЗВ}}(\nu)$  — спектральные коэффициенты пропускания трассы и облака загрязняющих веществ соответственно;  $\nu$  — волновое число;  $T$  — температура облака загрязняющих веществ и трассы. Дальнейшую обработку спектров можно проводить непосредственно согласно уравнению (1) составлением экспериментально наблюдаемого спектра из соответствующих спектров подстилающей поверхности и облака загрязняющих веществ. По-видимому, это не самый рациональный способ решения задачи для приземных трасс наблюдений, поскольку он требует обширной базы данных по спектральным свойствам различных подстилающих поверхностей и трасс наблюдения, но для ряда специфических задач данный подход оптимален.

Можно поступить иначе — предварительно снять спектр трассы ( $B_0$ ) при отсутствии облака загрязняющих веществ ( $\tau_{\text{ЗВ}} = 1$ ):

$$B_0 = P - \tau_{\text{тр}}(B_0^* - P). \quad (2)$$

Комбинируя выражения (1) и (2), получим соотношения

$$B = P + \tau_{3В}(B_0 - P),$$

или

$$\tau_{3В} = \frac{B - P}{B_0 - P}. \quad (3)$$

Можно получить соотношение, аналогичное выражению (3), но для условий, когда температура облака загрязняющих веществ ( $T_1$ ) и усредненная температура по трассе ( $T_2$ ) не совпадают. Проведя несложные алгебраические выкладки, получим в итоге

$$\tau_{3В} = \frac{B - P_2 + \tau_{тр}(P_2 - P_1)}{B_0 - P_2 + \tau_{тр}(P_2 - P_1)}, \quad (4)$$

где  $P_1 = P_1(\nu, T_1)$  и  $P_2 = P_2(\nu, T_2)$  — функции Планка. Однако даже для такой сравнительно простой модели, описываемой выражением (4), подбор параметра  $\tau_{тр}(\nu)$  требует дополнительных итерационных алгоритмов с привлечением баз данных типа HITRAN или GEISHA [3, 4]. Кроме того, требуется, чтобы были известны температуры трассы и облака загрязняющих веществ, что в натуральных условиях не всегда возможно с необходимой точностью. По этим причинам в качестве основы алгоритма решения задачи было выбрано соотношение (3). Для стелющихся (приземных) облаков загрязняющих веществ выражение (3) описывает общую процедуру обработки спектров, полученных с помощью ФСР. При первом сканировании полученный спектр записывается в базу данных и рассматривается в дальнейшем как  $B_0$ , при последующих сканах регистрируются спектры  $B$ . Далее в соответствии с выражением (3) вычисляются спектральный коэффициент пропускания облака загрязнителей и, следовательно, спектральная оптическая плотность  $D$ :

$$D(\nu) = -\ln(\tau_{3В}(\nu)) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\nu) N l_{3В},$$

где  $n$  — число веществ в облаке загрязняющих веществ;  $\sigma_i$  — сечение поглощения  $i$ -го вещества при заданном волновом числе ( $\nu$ );  $N l_{3В}$  — интегральная концентрация загрязняющих веществ. Таким образом, чисто теоретически задача сводится к решению стандартной обратной задачи спектроскопии.

**Предварительная обработка спектров.** В отличие от классических спектральных приборов, фурье-спектрометр не дает спектральное распределение яркости излучения объекта наблюдения, а формирует автокоррелограмму, которая с учетом чувствительности фотоприемника  $S(\nu)$ , спектральной функции пропускания оптического тракта  $F(\nu)$

и функции фазовых искажений прибора  $\phi(\nu)$  может быть задана выражением

$$I(x) = 2\pi \int_{-\delta}^{+\delta} R_0(\nu) B(\nu) \exp(i(2\pi\nu x - \phi(\nu))) d\nu, \quad (5)$$

где  $I(x)$  — регистрируемый сигнал двусторонней интерферограммы при разбалансе плеч интерферометра, равном  $x$ ;  $R_0(\nu) = S(\nu)F(\nu)$ ;  $B(\nu)$  — спектр излучения объекта наблюдения;  $\delta$  — максимальное смещение подвижного зеркала интерферометра. При использовании в ФСР высокочувствительных охлаждаемых фотоприемников возникает необходимость учета собственного (фонового) излучения прибора, поскольку мощность входного сигнала от объекта исследования может быть сопоставима с собственным приборным излучением. В работе [5] показано, что регистрируемую интерферограмму объекта наблюдения с учетом фонового излучения можно представить в виде

$$I(x) = 2\pi \int_{-\delta}^{+\delta} R_0(\nu) (B(\nu) - \varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu) P(\nu, T_{\text{ИФ}})) \exp(i(2\pi\nu x - \varphi(\nu))) d\nu, \quad (6)$$

где собственный фоновый (приборный) спектр является произведением эффективной излучательной способности  $\varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu)$  на функцию Планка  $P(\nu, T_{\text{ИФ}})$  при температуре  $T_{\text{ИФ}}$ , равной усредненной температуре деталей интерферометра. Естественно, что результат восстановления спектра по выражению (6) является комплексным:

$$\tilde{B}(\nu) = R_0(\nu) (B(\nu) - \varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu) P(\nu, T_{\text{ИФ}})) \exp(-i\phi(\nu)). \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что предварительная обработка спектров должна включать в себя две обязательные стадии — фазовую коррекцию интерферограмм и алгоритм исключения из получаемого спектра фоновой составляющей излучения.

*Коррекция фазы.* Фазу  $\phi(\nu)$  можно определить непосредственно из соотношения (7) как аргумент комплексного спектра, но это определение, строго говоря, неоднозначно: из-за изменения фазовой функции на  $\pi$  рад или смены знака разностного сигнала могут получиться одинаковые спектры. Неоднозначность определения можно устранить с учетом того, что функция фазовых искажений — медленно изменяющаяся функция волнового числа. Таким образом, фаза спектра (7) должна представлять собой медленно изменяющуюся функцию с резкими изменениями на  $\pi$  рад в точках смены знака разности  $B(\nu) - \varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu) P(\nu, T_{\text{ИФ}})$ . Функцию фазовой коррекции можно получить

выделением непрерывной составляющей фазы измеренного комплексного спектра. Это достижимо путем аппроксимации  $\phi(\nu)$  полиномом невысокой степени (в данном случае — квадратичным:  $\phi(\nu) = \sum_{i=0}^2 k_i \nu^i$ ), коэффициенты которого  $k_i$  определялись из условия минимума квадрата функции вида

$$\Phi(k_0, k_1, k_2) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \left( \operatorname{Re} \tilde{B}(\nu) \sin(\phi(\nu)) + \operatorname{Im} \tilde{B}(\nu) \cos(\phi(\nu)) \right)^2 d\nu,$$

где  $\nu_{\min}, \nu_{\max}$  — минимальное и максимальное волновые числа регистрируемого спектра.

*Учет фоновой составляющей сигналов.* Для исключения в исходных спектрах фоновой (приборной) составляющей необходимо, чтобы были известны функции  $R_0(\nu)$ ,  $\varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu)$  и температура  $T_{\text{ИФ}}$  деталей интерферометра. Эти функции можно найти из измерений, проведенных для эталонных источников инфракрасного излучения при их различных температурах и различных собственных температурах интерферометра ФСР.

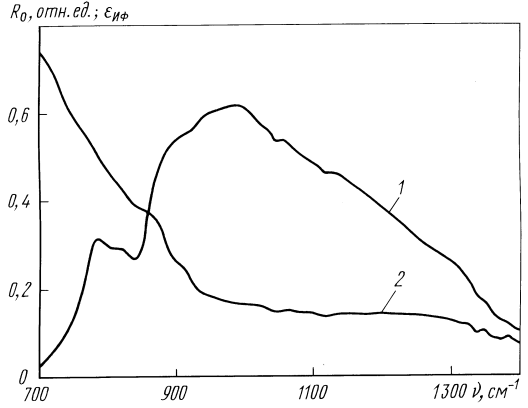
Пусть имеется несколько измерений спектров  $B_i(\nu)$ , выполненных для источников излучения с абсолютными температурами  $T_i$  и излучательными способностями  $\varepsilon_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , причем при каждом измерении внутренним датчиком фиксировалась температура  $T_{\text{ИФ}}$  корпуса интерферометра. Тогда с учетом переопределенности системы (при  $n > 2$ ) получаем для каждой точки по волновым числам следующие уравнения для определения  $R_0$  и  $\beta = \varepsilon_{\text{ИФ}} R_0$ :

$$\begin{aligned} \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 P^2(T_i) \right) R_0 - \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P(T_i) P(T_{\text{ИФ}}) \right) \beta &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P(T_i) B_i, \\ \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P(T_i) P(T_{\text{ИФ}}) \right) R_0 - \left( \sum_{i=1}^n P^2(T_{\text{ИФ}}) \right) \beta &= \sum_{i=1}^n P(T_{\text{ИФ}}) B_i. \end{aligned} \quad (8)$$

Решая систему (8) для каждого значения  $\nu$ , найдем функции  $R_0(\nu)$  и  $\varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu)$ , с помощью которых можно легко исключить из спектров фоновую составляющую. На рис. 1 приведены искомые функции  $R_0(\nu)$  и  $\varepsilon_{\text{ИФ}}(\nu)$  экспериментального макета ФСР.

**Финишная обработка спектров.** Опишем алгоритм обработки спектров, необходимость которой вызвана непостоянством положения наблюдаемых спектров, малыми температурными контрастами и, как следствие, пересечением фоновых и экспериментальных спектров. Задача данного этапа обработки — ранжировать спектры, как это следует из соотношения (3), согласно которому спектры  $B$  облака загрязняю-

**Рис. 1. Аппаратные функции ФСР:** 1 — функция спектральной чувствительности ФСР ( $R_0$ ), 2 — эффективная излучательная способность ( $\epsilon_{\text{ИФ}}$ )



щих веществ и  $B_0$  трассы без облака загрязняющих веществ, а также функция Планка  $P(\nu, T)$  должны удовлетворять соотношениям

$$B_0 \leq B \leq P \quad \text{либо} \quad P \leq B \leq B_0 \quad (9)$$

для каждого волнового числа из рассматриваемого интервала (вид неравенства зависит от знака яркостного контраста).

В зависимости от режима работы прибора использовались следующие алгоритмы ранжирования. Если температура облака известна с достаточной точностью, вычислялся температурный контраст

$$\Delta T = \frac{T}{4} \left( \frac{\langle B, P \rangle}{\langle P, P \rangle} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $T$  — абсолютная температура облака, а скалярные произведения рассчитывались по формуле

$$\langle A, B \rangle = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} A(\nu)B(\nu)d\nu.$$

При достаточно большом положительном температурном контрасте  $\Delta T > 2 \dots 3 \text{ К}$  спектр сигнала лежал выше спектра функции Планка, поэтому наблюдался спектр поглощения, а спектр фона лежал еще выше. При большом отрицательном контрасте спектр фона оказывался ниже спектра сигнала. Если спектры фона и сигнала пересекаются между собой, то спектр фона подстраивался так, чтобы он лежал выше или ниже спектра сигнала. Для этого спектр фона представлялся в виде

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

где  $\overline{B}_0(\nu)$  — первоначально измеренный спектр, а константы  $a, b$  выбираются из следующих соображений: спектр фона должен лежать выше

(или ниже) спектра сигнала; на краях спектрального участка спектры сигнала и фона не должны сильно различаться.

С помощью итерационной процедуры подстройки изменялся параметр  $a$  таким образом, чтобы (с известным допуском) спектр фона лежал выше или ниже спектра сигнала; далее при фиксированном значении  $a$  параметр  $b$  выбирался таким образом, чтобы минимизировать разность спектров сигнала и фона на краях спектрального участка.

*Коррекция температуры облака загрязняющих веществ.* В ситуации, когда температурный контраст мал или температура облака не могла быть измерена с достаточной точностью, процедура подстройки спектра фона сопровождалась процедурой подстройки температуры. В рамках этой процедуры вместо функции Планка использовалось выражение  $(1 + c\nu)P(T, \nu)$ , где подстройке подлежала температура  $T$  и параметр  $c$ . Критерии подстройки функции Планка аналогичны критериям подстройки спектра фона — функция Планка должна лежать выше (или ниже) спектра сигнала, а на краях рабочего диапазона спектр сигнала и функция Планка не должны сильно различаться. В данном случае значение температуры снова подбиралось таким образом, чтобы выполнялось первое из условий (9), а параметр  $c$  выбирался таким образом, чтобы на краях спектра значения сигнала и функции Планка были близки.

Вследствие того, что в подобных случаях нельзя заранее предсказать, будет ли функция Планка лежать выше или ниже спектра сигнала, анализ проводился для обоих вариантов, т.е. производилась подстройка и сверху, и снизу, причем спектр фона подстраивался таким образом, чтобы выполнялось соотношение (9), как это описано выше.

*Определение температурного контраста и коррекция спектра.* После подстройки спектра фона (и, возможно, температуры) проводилось вычисление коэффициента поглощения в облаке загрязняющих веществ на основе соотношений (3), а также заново вычислялся температурный контраст по формуле (10). Обычно рассматривалось несколько возможных вариантов расположения спектра фона и функции Планка относительно спектра сигнала, как это описано ранее. Выбор одного из вариантов производился на основе результатов решения задачи распознавания в каждом случае.

**Алгоритм идентификации и определения концентрации загрязняющих веществ.** *Процедура отбора веществ из базы данных согласно коэффициентам корреляции.* Практика расчетов показала, что результаты распознавания менее надежны, если применяется корреляционный алгоритм распознавания одновременно многих веществ. С целью повышения надежности процедуры было реализовано предвари-

тельное определение ограниченного набора веществ, для которых проводится количественный анализ.

На предварительном этапе рассчитывались корреляции спектров (коэффициентов пропускания) веществ из базы данных и полученного по формуле (3) спектра падающего излучения:

$$r_i = \frac{\langle \tau_i - \bar{\tau}_i, \tau - \bar{\tau} \rangle}{\sqrt{\langle (\tau_i - \bar{\tau}_i)^2 \rangle \langle (\tau - \bar{\tau})^2 \rangle}}, \quad (11)$$

где  $\tau$  — измеренный спектр пропускания, а  $\tau_i$  — спектр пропускания  $i$ -го вещества из базы данных. Скалярные произведения вычислялись следующим образом:

$$\langle A, B \rangle = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} A(\nu)B(\nu)w(\nu) d\nu,$$

а средние значения — по формуле

$$\bar{A} = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} A(\nu)w(\nu) d\nu,$$

при этом весовая функция  $w(\nu)$  отражала погрешности определения коэффициента пропускания в каждой точке спектра и нормировалась таким образом, чтобы

$$\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} w(\nu) d\nu = 1.$$

Таким образом, определялось вещество, обладающее максимальным коэффициентом корреляции.

*Нахождение второго и последующих компонентов смеси загрязняющих веществ.* В связи с тем, что при наличии нескольких веществ в облаке загрязняющих веществ корреляции более слабых примесей могут быть сильно искажены влиянием основного вещества, проводилась процедура исключения первого найденного вещества из исходного спектра. Для этого решалась задача определения его концентрации: необходимо найти значение  $C$  такое, при котором достигается минимум функции невязки

$$\Phi(C) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} (\exp(-CD(\nu)) - \tau(\nu))^2 w(\nu) d\nu, \quad (12)$$



где  $D(\nu)$  — оптическая плотность для указанного вещества. Для найденного значения  $C^*$  из исходной функции вычитался вклад, соответствующий данному веществу:

$$\tau'(\nu) = \frac{\tau(\nu)}{\exp(-C^*D(\nu))}.$$

После этого коэффициенты корреляции остальных веществ пересчитывались заново, и процедура исключения повторялась для второго, третьего и т.д. веществ, обладающих наибольшими коэффициентами корреляции. Таким образом, для количественного анализа может быть использовано заранее заданное число веществ. Описанная процедура может привести к определению меньшего количества веществ, если наложить требование, чтобы коэффициенты корреляции для них были положительны и превосходили некоторый заданный минимальный уровень.

*Определение концентраций компонентов смеси веществ.* После отбора  $M$  веществ проводился количественный анализ с помощью формулы, аналогичной формуле (12), т.е. минимизировалась функция вида

$$\Phi(C_1, \dots, C_M) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \left( \exp \left( - \sum_{m=1}^M C_m D_m(\nu) \right) - \tau(\nu) \right)^2 w(\nu) d\nu, \quad (13)$$

где  $m$  — номер вещества из базы данных. Минимизация нелинейного функционала (13) проводилась с учетом ограничений на неотрицательность коэффициентов  $C_i \geq 0$ , причем ограничения накладывались и сверху, так как при очень больших концентрациях коэффициенты  $C_i$  с достаточной точностью не могут быть определены и, наконец, величины концентраций веществ в газовой фазе не могут превышать значений насыщенного пара при данной температуре.

Альтернативным методом является переход от коэффициентов пропускания к оптическим плотностям, в результате чего рассматривается линейная система уравнений относительно оптических плотностей, но ее решение также требует применения итерационных алгоритмов, если используются рассмотренные ограничения.

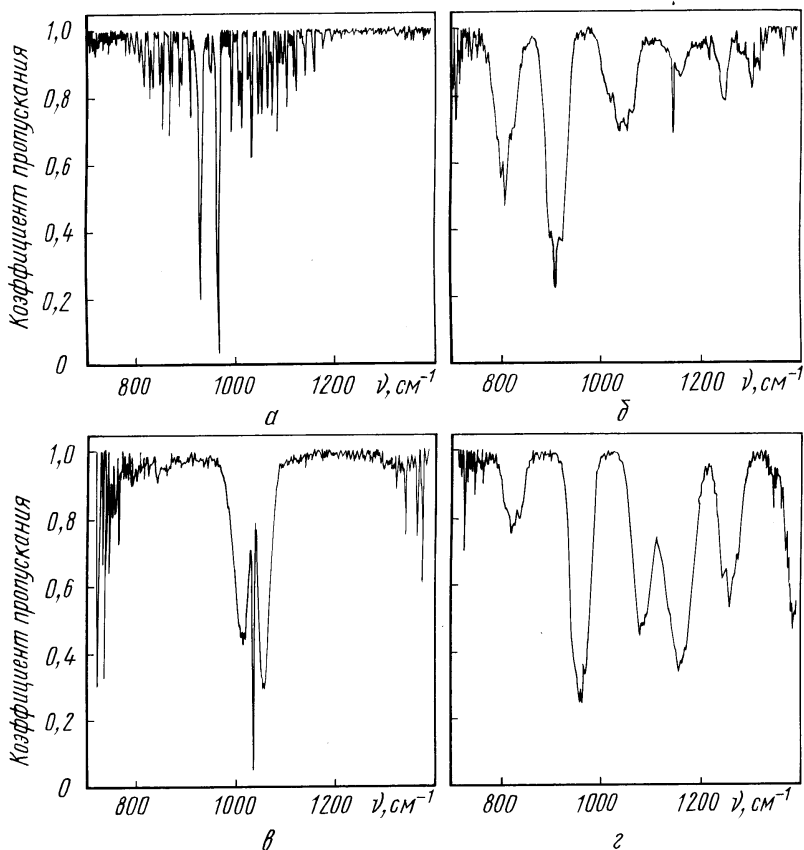
Фактически вместо интеграла в правой части выражения (13) стоит сумма по числу точек спектра (обычно по нескольким сотням точек). Переопределенность системы позволяет оценить погрешность вычисляемого решения по стандартным формулам, построив квадратичную аппроксимацию функционала (13) в точке минимума.

*Определение списка распознанных веществ.* В окончательный список распознанных веществ включались те из них, для которых значения

концентраций превосходят ошибку их определения. Кроме того, для каждого вещества в базе данных задавалась некоторая пороговая концентрация, которая должна быть превышена, в противном случае вещество исключалось из списка.

**База спектральных данных.** База спектральных данных загрязняющих веществ является одним из основных компонентов программного обеспечения комплекса ФСР. Только с ее помощью возможно проведение процедур идентификации и определение концентраций загрязняющих веществ, в том числе при многокомпонентном загрязнении. Очевидно, что качество базы данных играет ключевую роль в решении поставленной задачи. Прямое использование имеющихся баз данных, в том числе коммерческих, не всегда возможно по нескольким причинам. Конструктивная особенность подвески подвижного зеркала, примененного в данном ФСР, приводит к умножению исходной интерферограммы на специфичную функцию аподизации и, как следствие, к изменению вида полос и линий поглощения, формы которых могут не совпадать с представленными в исходной базе данных. Не всегда концентрации веществ в базах данных близки по своим величинам к наблюдаемым, а условия их получения — к наблюдаемым в естественных условиях. Именно по этим причинам была создана спектральная база данных основных загрязняющих веществ и их имитаторов, для чего использовалась однопроходовая оптическая кювета длиной 8 м и сечением  $0,6 \text{ м}^2$  с принудительным механическим перемешиванием и вентилированием объема. В качестве источника подсветки применялся широкоапертурный термостабилизированный источник инфракрасного излучения, близкий по параметрам к абсолютно черному телу с яркостной температурой от  $+4$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Для контроля величин концентраций в кювете применялись как спектральная методика, так и проботорборные методы аналитической химии.

Регистрацию спектров проводили классическим методом. Сначала снимали спектр кюветы, заполненной атмосферным воздухом, потом спектр фонового абсолютно черного тела с температурой, равной комнатной, и затем в кювету вводили требуемое количество вещества. Спектральный коэффициент пропускания рассчитывали по соотношению (3) с последующей его коррекцией, заключающейся в том, что из конечного спектра  $D = D(\nu)$  исключали постоянную составляющую в рабочем диапазоне  $700 \dots 1400 \text{ см}^{-1}$ , после чего спектр вносился в исходную базу данных. Данная процедура является обязательной, так как при обработке экспериментальных спектров в натуральных условиях программа на заключительном этапе работы автоматически исключает постоянную составляющую, если таковая возникала при обработке.



**Рис. 2. Спектральные коэффициенты пропускания:** *а* – аммиака (интегральная концентрация  $0,34 \text{ г/м}^2$ ); *б* – гептила ( $3 \text{ г/м}^2$ ); *в* – метанола ( $1,2 \text{ г/м}^2$ ); *г* – изопропанола ( $4,9 \text{ г/м}^2$ )

На рис. 2 приведены спектральные коэффициенты пропускания для ряда веществ из созданной базы данных.

**Результаты экспериментов.** Первым этапом экспериментальных работ было лабораторное тестирование ФСР в режиме обнаружения с использованием оптической кюветы. После ввода заданного количества паров вещества (или смеси веществ) контролировался момент срабатывания ФСР при обнаружении вещества (смеси), правильность детектирования вещества и/или компонентов смеси и определялись концентрации обнаруженных компонентов. При испытаниях с помощью кюветы регистрировались предельные минимальные обнаруживаемые концентрации как отдельных веществ (табл. 1), так и смесей типа метанол–аммиак и метанол–аммиак–ацетон. Во всех проведенных экспериментах были зарегистрированы все компоненты смесей с определением их концентраций при яркостном контрасте, не превышающем  $5 \dots 7 \text{ К}$ .

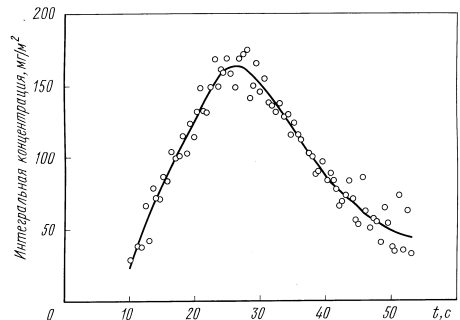
**Минимальные обнаружимые концентрации веществ при яркостном контрасте не более 5...7 К**

№	Вещество	Минимальная обнаружимая интегральная концентрация, мг/м <sup>2</sup>	Минимальная обнаружимая концентрация при размере облака $L \approx 100$ м, мг/м <sup>3</sup>
1	Гептил	60	0,6
2	Метанол	20	0,2
3	Аммиак	10	0,1
4	Ацетон	150	1,5
5	Фенол	200	2
6	Бензол	300	3
7	Толуол	800	8

Экспериментальные работы в натуральных условиях были проведены утром при минимальных яркостных контрастах трасс, т.е. в наиболее жестких условиях работы для ФСР. Мишенная обстановка создавалась принудительным распылением в воздухе заданного вещества на высотах, не превышающих  $\sim 50$  м. Минимальный объем при распылении вещества (или его раствора) составлял около 0,4 л. Испытания проводились на расстоянии 0,5...6 км от ФСР до места распыления.

Тестирование работы ФСР проводилось в одном из двух возможных режимов срабатывания: в режиме срабатывания по первому факту обнаружения и в режиме перманентной (непрерывной) записи результатов работы в файл.

В режиме сканирования одного или нескольких секторов на расстояниях 1 и 2,5 км от ФСР надежно обнаруживались пары аммиака. На рис. 3 приведены результаты перманентной записи данных в файл при обнаружении облака паров аммиака на статической трассе длиной 0,5 км при одиночном заряде аммиака массой 80–90 г (0,45 л 20 %-ного раствора аммиачной воды). Наблюдение облака велось при неизменных углах возвышения и места. На этой же трассе успешно проведены серии экспериментов по обнаружению смесей паров этило-



**Рис. 3. Временная зависимость изменения концентраций облака аммиака (суммарная масса аммиака в облаке — около 90 г)**

вого и изопропилового спирта, ацетона и аммиака в различных комбинациях. На трассе длиной 2,5 км наблюдение и фиксация параметров облака паров аммиака при разовом распылении 0,7 кг аммиачной воды проводилось непрерывно в течение более 40 мин.

Наблюдение облаков загрязняющих веществ на трассах различной протяженности позволило определить минимально регистрируемые концентрации паров аммиака. Результаты экспериментов приведены в табл. 2, там же приведены усредненные яркостные контрасты трасс, которые измерялись с помощью калиброванного панорамного тепловизора при диапазоне 8...12 мкм с точностью определения яркостных температур около 0,1 К.

Таблица 2

**Минимально обнаружимые концентрации паров аммиака в зависимости от расстояния от ФСР до облака загрязняющих веществ**

Расстояние, км	Оценка минимальной обнаружимой концентрации, мг/м <sup>2</sup>	Температурный контраст, К
0,5	~ 12	5...6
1	~ 15	4
1,5	~ 25	2...4
2,5	~ 30	2
4	~ 20	2...3
6	~ 30	2

**Заключение.** В настоящей работе представлен один из апробированных вариантов алгоритма работы комплекса фурье-спектрометра в естественных условиях. Полученные экспериментальные результаты подтверждают перспективность применения фурье-спектрометра для решения задач оперативного контроля состава воздушной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворук С. К., Кочиков И. В., Морозов А. Н., Назолин А. Л., Павлов Д. А., Поздняков В. А., Соловьев А. В., Светличный С. И., Табалин С. Е. Применение фурье-спектрометра для определения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67. – № 3. – С. 37–42.

2. Дворук С. К., Корниенко В. Н., Кочкиков И. В., Морозов А. Н., Поздняков В. А., Светличный С. И., Соловьев А. В., Табалин С. Е., Шишкин Г. В. Применение фурье-спектрометриии для анализа необратимых химических и физических процессов в природе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". – 2001. – № 1. – С. 87–101.
3. Rothman J. et al. The HITRAN database 1986 // Appl. Opt. – 1987. – V. 26. – P. 4058–4097.
4. Chedin A. et al. The GEISHA Spectroscopic line parameter data bank in 1984 // Ann. Geophys. – 1984. – V. 4. – P. 2.
5. Дворук С. К., Корниенко В. Н., Кочкиков И. В., Лельков М. В., Морозов А. Н., Поздняков В. А., Светличный С. И., Табалин С. Е. Обработка двусторонних интерферограмм с учетом собственного фонового излучения фурье-спектрометра // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93. – № 6. – С. 1048–1053.

Статья поступила в редакцию 13.02.2003

Андрей Юрьевич Бойко родился в 1968 г., окончил в 1990 г. Саратовское высшее военное инженерное училище химической защиты. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Центрального научно-исследовательского испытательного института. Автор более 20 научных работ в области спектроскопии, оптической локации и прецизионных измерений.

A.Yu. Boiko (b. 1968) graduated from the Saratov Military Higher School for Chemical Defense in 1990. Ph.D. (Eng.), senior researcher, head of department of the Central Research Institute for Testing. Author of over 20 publications in the field of spectroscopy, optical radar and precision measuring.

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 the Central Research Institute for Testing. Author of over 100 publications in the field of mathematical simulation, spectroscopy and optical radar.

Григорий Владимирович Мацюк родился в 1958 г., окончил в 1987 г. Военную академию химической защиты. Старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского испытательного института. Автор более 50 научных работ в области аналитической химии, оптической локации и прецизионных измерений.

G.V. Matsyuk (b. 1958) graduated from the Military Academy for Chemical Defense in 1987. Senior researcher, deputy director of the Central Research Institute for Testing. Author of over 50 publications in the field of analytical chemistry, optical radar and high precision measuring.

Александр Юрьевич Павлов родился в 1958 г., окончил в 1981 г. Саратовское высшее военное инженерное училище химической защиты. Д-р хим. наук, старший научный сотрудник, зам. начальника Центрального научно-исследовательского испытательного института. Автор более 100 научных работ в области аналитической химии, спектроскопии и прецизионных измерений.

A.Yu. Pavlov (b. 1958) graduated from the Saratov Military Higher School for Chemical Defense in 1981. D.Sc. (Chemistry), senior researcher, deputy director of the Central Research Institute for Testing. Author of over 100 publications in the field of analytical chemistry, spectroscopy and high precision measuring.

Петр Евгеньевич Шлыгин родился в 1969 г., окончил в 1991 г. Саратовское высшее военное инженерное училище химической защиты. Старший инженер Центрального научно-исследовательского испытательного института. Автор более 10 научных работ в области оптической локации и прецизионных измерений.

P.Ye. Shlygin (b. 1969) graduated from the Saratov Military Higher School for Chemical Defense in 1991. Senior engineer of the Central Research Institute for Testing. Author of over 10 publications in the field of optical radar and high precision measuring.

Станислав Казимирович Дворук родился в 1958 г., окончил в 1986 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий инженер Центра прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области прецизионных измерений.

S.K. Dvoruk (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow High Technical School in 1986. Leading engineer of Applied Physics Center of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of high precision measuring.

Максим Викторович Лельков родился в 1976 г., окончил в 2000 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры "Физика" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 4 научных работ в области расчета и создания оптических систем.

M.V. Lelkov (b. 1976) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2000. Post-graduate of "Physics" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of computation and creation of optical systems.



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 over 100 publications in the field of high precision measuring and physical kinetics.

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.

Григорий Владимирович Шишкин родился в 1979 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 4 научных работ в области систем управления.

G.V. Shishkin (b. 1979) graduated from the Bauman Moscow State Technical University. Post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of control systems.

Владимир Николаевич Корниенко родился в 1966 г., окончил в 1989 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН. Автор более 50 научных работ в области вакуумной микроволновой электроники.

V.N. Kornienko (b. 1966), graduated from the Moscow State University n.a. Lomonosov in 1989. Ph.D. (Phys.-Math.), senior researcher of the Institute for Radio Electronics of the Russian Academy of Sciences. Author of over 50 publications in the field of vacuum microwave electronics.

Игорь Викторович Кочиков родился в 1959 г., окончил в 1982 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИВЦ МГУ. Автор более 50 научных работ в области математической физики и вычислительной математики.

I.V. Kochikov (b. 1959) graduated from the Moscow State University n. a. Lomonosov in 1982. PhD (Phys.-Math.), senior researcher of "NIVTs" center of the Moscow State University n.a. Lomonosov. Author of over 50 publications in the field of mathematical physics and computation mathematics.

Сергей Иванович Светличный родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский физико-технический институт. Канд. физ.-мат. наук, директор филиала Института энергетических проблем химической физики РАН. Автор более 60 научных работ в области химической физики и спектроскопии.

S.I. Svetlichny (b. 1950) graduated from Moscow Physical and Technical Institute in 1973. Ph.D. (Phys.-Math.), director of Affiliation of the Institute for Energy Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences. Author of over 60 publications in the field of chemical physics, spectroscopy.

---

УДК 621.373+535

В. Г. М а р ч е н к о

## **ПОЛЯ ОТКРЫТЫХ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ**

*Изложен подход с применением ключевых систем к расчету полей широкоапертурных лазеров с резонаторами, образованными плоскими, выпуклыми и вогнутыми зеркалами, основанный на точном решении полного волнового уравнения в скалярном представлении. Сформулирован физический смысл спецфункций разделяющих систем координат.*

Открытые оптические резонаторы являются важным элементом квантовых оптических генераторов — лазеров. Их функции не ограничиваются созданием положительной обратной связи в оптических генераторах: с их помощью формируются поля с определенными свойствами в ближней и дальней зонах излучения.

Исторически лазеры прошли путь от генераторов с малыми апертурами резонаторов (с диаметром апертуры  $a$  порядка нескольких миллиметров, длиной резонатора  $L$  около метра, числами Френеля  $N = a^2/4\lambda L \lesssim 1$ , где  $\lambda$  — длина волны) и — по мере возрастания