

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.508.951:681.785.574

ПРИМЕНЕНИЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ ДЛЯ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЕ

© Авторы, 2011

Морозов А.Н. — Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: amor59@mail.ru

Светличный С.И. — Кандидат физико-математических наук, директор филиала Института энергетических проблем химической физики РАН, (ФИНЭПХФ РАН), г. Черноголовка, Московская область

E-mail: svetl@biner.ac.ru

Табалин С.Е. — Научный сотрудник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: tabalin@mail.ru

Аннотация

В статье даны описания разработанных Фурье-спектрометрических устройств для задач поиска, идентификации и определения интегральных концентраций паров химических соединений в открытой атмосфере методом пассивной локации. Приводятся характеристики и экспериментальные данные полевых испытаний разработанных Фурье-спектрометрических устройств.

Ключевые слова: Фурье-спектрометр, пассивная локация, химические соединения, интерферограмма

Abstract

In the article are given descriptions of the developed FTIR radiometers for the tasks of search, identification and determining the concentrations of vapors of chemical compounds in the open atmosphere by the method of passive location. Characteristics and experimental data of the field tests of the developed FTIR radiometers are given.

Key words: FTIR radiometer, remote sensing, pollutants, interferogram

Дистанционный контроль качества атмосферы сегодня является одной из приоритетных и актуальных аналитических задач не только из-за наличия в выбросах предприятий вредных веществ, но и из-за происходящих техногенных аварий и катастроф. Значительные величины концентраций загрязняющих веществ в ряде случаев делают невозможным применение пробоотборных методик из-за возможных негативных воздействий на персонал. Часто и отбор проб невозможен из-за физической недоступности объекта контроля. По этим причинам разработка и создание дистанционных аналитических методик и аппаратуры, работающих в режиме реального времени и сочетающих высокую мобильность и автоматизм, чрезвычайно актуальны. Среди аналитической аппаратуры лидирующее положение занимают оптические методы контроля состава атмосферы, подразделяющиеся на активные и пассивные [1]. Активные методы используют внешние мощные просвечивающие источники [2]. Пассивные регистрируют и анализируют собственное тепловое излучение атмосферы и исследуемого объекта. Физическая модель пассивной методики регистрации спектров [3] представлена на рис. 1.

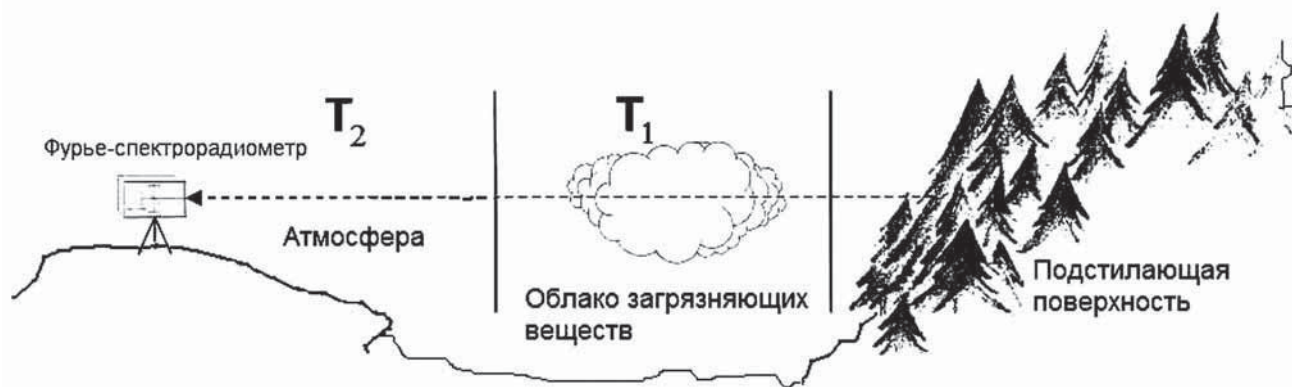


Рис. 1. Упрощенная модель регистрации спектров с помощью Фурье-спектрометра методом пассивной локации

Очевидно, что один из прямых способов получения информации о распределении и концентрациях молекул — это сопоставление расчетного и экспериментального спектров, основанное на процедурах последовательного их приближения. 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 их зависимость от температуры. Особое значение приобретает абсолютная калибровка спектрометра и прежде всего ее точность. Подобный алгоритм требует мощной вычислительной техники, способной обеспечить обработку данных в режиме реального времени.

Для задач локального мониторинга можно вывести соотношение, связывающее экспериментально получаемые спектры облака загрязняющих веществ (ЗВ) (испускания или поглощения) и, в принципе, позволяющее избежать сложных итерационных процедур. Пусть облако загрязняющих веществ ЗВ с характерным размером l , температурой T_1 и коэффициентом пропускания $\tau_{ЗВ} = \exp(-\sum_i \sigma_i n_i l) = \exp(-D_1)$, где σ_i

и n_i — сечение поглощения и концентрация i -го компонента, D_1 — оптическая толщина облака загрязняющих веществ, расположено на некотором расстоянии от входного зрачка Фурье-спектрометра (см. рис. 1). Примем температуру трассы равной T_2 , а ее спектральный коэффициент пропускания — $\tau_{тр} = \exp(-D_2)$, где D_2 — оптическая толщина трассы измерения. Тогда наблюдаемый спектр при заданном волновом числе 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 Φ_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 . При концентрации ЗВ, равной нулю ($D_1=0$), имеем $B_0(\nu) = \Phi_0 e^{-D_2} + P_2 (1 - e^{-D_2})$, откуда легко получить выражение для Φ_0 :

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

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

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

где $\Delta P = P_1 - P_2$. Даже для такой простой модели вычисление коэффициента пропускания облака ЗВ представляет сложную задачу, поскольку необходимо знать температуры трассы и облака ЗВ соответственно, а также расстояние до облака ЗВ. Знание длины трассы необходимо для расчета ее спектрального коэффициента пропускания τ_{tp} . Однако если облако ЗВ имеет температуру, близкую или равную температуре трассы наблюдения, что характерно для горизонтальных приземных трасс, т.е. $T_1 \approx T_2$, то выражение (3) упростится:

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

Из (4) следует, что спектр поглощения или излучения $B(v)$ можно наблюдать при наличии ненулевого контраста $\Delta B(v, T) = [B_0(v) - P(v, T)] \neq 0$, причем если $\Delta B(v, T) > 0$, регистрируется спектр поглощения, а если $\Delta B(v, T) < 0$ — спектр излучения облака ЗВ.

Таким образом, для того чтобы получить спектральную зависимость оптической плотности облака ЗВ, необходимо обработать три спектра: спектры излучения трассы наблюдения с облаком ЗВ — $B(v)$, чистой трассы $B_0(v)$ (т.е. при концентрации ЗВ, равной нулю) и предельный спектр — спектр абсолютно черного тела, описываемый функцией Планка $P(v, T)$. Необходимо отметить, что реально существующий в открытой атмосфере температурный контраст обычно составляет диапазон от единиц до десятков градусов, что накладывает повышенные требования на чувствительность регистрирующей аппаратуры.

Знание величины яркостного контраста данной полевой трассы измерений позволяет рассчитать минимально регистрируемую интегральную концентрацию загрязняющего вещества (масса вещества по трассе единичного сечения). Действительно, пусть отношение сигнал/шум разностного спектра $\Delta B(v, T)$ равно $\eta(v) = \Delta B(v) / \delta B$, где δB — средний квадратичный уровень шума. Тогда величина минимально регистрируемой концентрации по закону Бугера–Ламберта–Бера, будет равна

$$\tau_{\min} = \exp(-\sigma n_{\min} l) = \frac{B_0(v) - \delta B - P(v, T)}{B_0(v) - P(v, T)} = \left(1 - \frac{1}{\eta}\right). \quad (5)$$

Откуда $D_{\min} = \sigma n_{\min} l = -\ln(1 - 1/\eta)$ и при $\eta \gg 1$, разлагая логарифм в ряд, получаем

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

Аналогично оценка максимально возможной измеряемой оптической толщины и интегральный концентрации приводит к следующим соотношениям:

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

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

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{1}{D} \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial B} \delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial B_0} \delta B_0\right)^2} = \frac{1}{\eta D} \sqrt{1 + e^{2D}}. \quad (8)$$

Из (6)–(8) следует, что для $\eta = 100$ полный динамический диапазон измеряемых оптических толщин D занимает область от 0,01 до 4,61 с минимальной относительной ошибкой измерения интегральных концентраций около 3% в районе $D \sim 1$. Для $D = 0,01$ относительная ошибка достигает величины 140%. Для диапазона изменений оптической толщины от 0,1 до 4,6 относительная ошибка измерений не превышает 20%. Приведенные ошибки соответствуют измерениям, проводимым по одной спектральной точке. Практически полоса поглощения вещества покрывается несколькими точками, и, следовательно, точность определения только возрастет.

Высокочувствительный способ многокомпонентного анализа сред по колебательно-вращательным спектрам молекул реализуется при использовании метода Фурье-спектроскопии благодаря ряду его принципиальных достоинств: высокая светосила, способность регистрации собственного излучения молекул, широкий спектральный диапазон, ограниченный лишь спектральной чувствительностью фотоприемника, одновременность и быстрота регистрации всех спектральных компонент исследуемой среды, принципиально высокая степень автоматизации измерений и диагностики состояний системы за счет использования ЭВМ [3, 4]. В основе подобных спектрометров лежит любое устройство, модулирующее световой поток в зависимости от длины волны излучения. Как правило, в Фурье-спектрометрах применяют классический двухлучевой интерферометр Майкельсона, состоящий из двух зеркал (одно из которых подвижное) и светоделителя. Типичная блок-схема Фурье-спектрометра представлена на рис. 2.

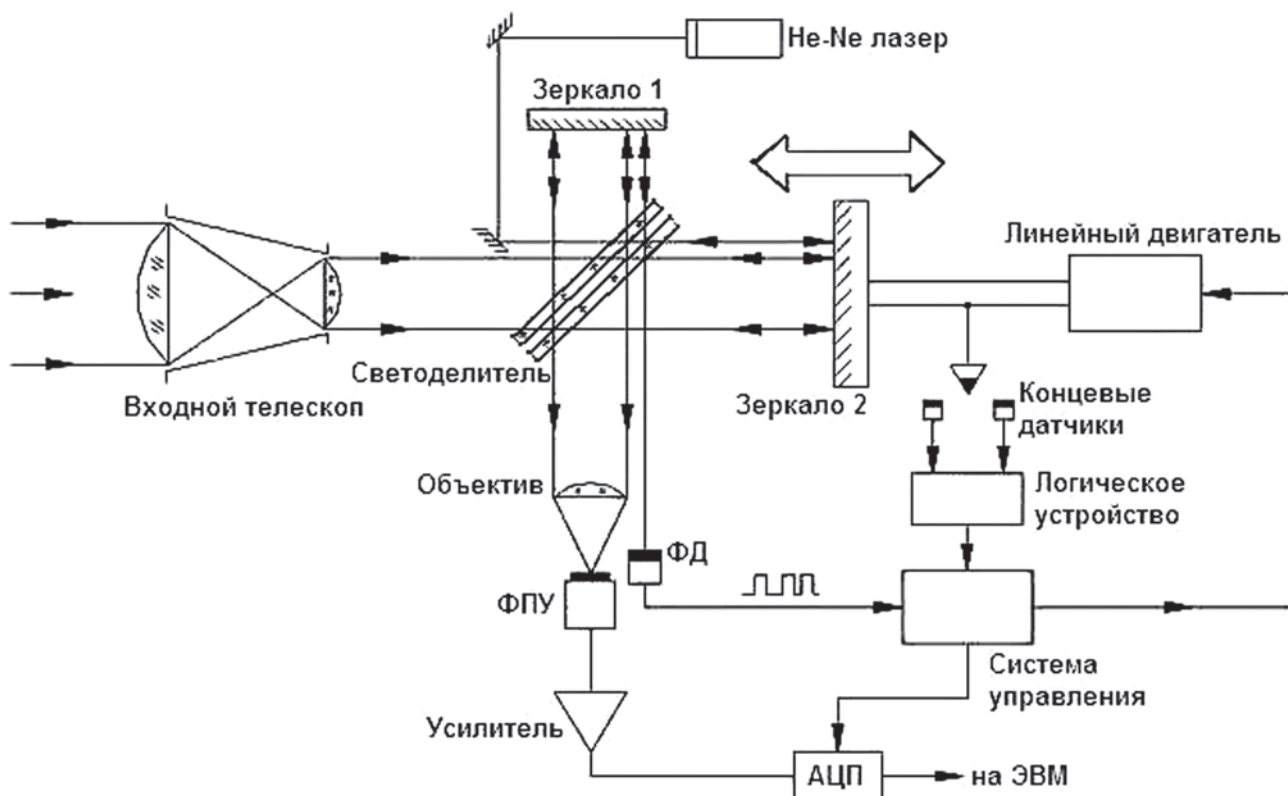


Рис. 2. Типичная блок-схема Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона. ФПУ — фотоприемное устройство, ФД — фотодиод, АЦП — аналого-цифровой преобразователь

Фотоприемным устройством при движении зеркала регистрируется не сам спектр излучения объекта, а его автокоррелограмма, иначе называемая интерферограммой:

$$I(x) \sim \int_0^{+\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu,$$

где x — величина смещения подвижного зеркала от положения, соответствующего нулевой разности оптического хода. Обратным преобразованием Фурье исходный спектр может быть восстановлен:

$$B(\nu) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \cos(2\pi\nu x) dx.$$

Естественно ожидать, что наиболее эффективна работа Фурье-спектрометра (ФСР) в ИК-диапазоне, на который приходится максимум спектральной яркости энергетической светимости

объектов наблюдения. В то же время этот диапазон спектра должен являться и окном прозрачности атмосферы. По этим причинам спектральная область 7–14 мкм является основной для подавляющего большинства разработанных моделей ФСР [3]. Более того этот диапазон известен в литературе и как область «отпечаток пальцев» (finger print), именно в нем подавляющее большинство химических соединений имеют характерные полосы (линии) поглощения [5].

Сегодня на мировом рынке представлено значительное количество образцов Фурье-спектрометров, выполненных в перевозимом или мобильном вариантах. Среди представителей этого класса следует упомянуть серию спектрометров типа MR фирмы ABB Bomem Inc. (США–Канада) и модель K300 фирмы Kayser-Threde (Германия), обеспечивающие спектральное разрешение от 1 до 32 см⁻¹ при скорости сканирования до 100 спектров/с. Разработанные образцы комплектуются мощными ИК-источниками и ориентированы для работы по активной методике.

На сегодняшний день на рынке появилось поколение ФСР, изначально ориентированных на работу в пассивном режиме. Это разработки фирм ABB Bomem Inc. (США–Канада), Bruker (США–Канада), Blocking Engineering (США) [6]. В качестве примера в табл. 1 представлены значения минимально регистрируемых концентраций ряда веществ с помощью модели EM 27 (ранее OPAG 22) фирмы Bruker с временем накопления 1 мин и спектральным разрешением 1 см⁻¹ [7]. Значения интегральных концентраций приведены в расчете на единичный яркостный температурный зазор между подстилающей поверхностью и исследуемым веществом.

Таблица 1. Минимально обнаружимые концентрации, регистрируемые Фурье-спектрографами Bruker EM 27 при пассивной методике наблюдения

№ п/п	Вещество	Концентрация, мг/м ²
1	Акрилонитрил	960
2	Диоксид серы	430
3	Диоксид азота	210
4	1,1,1-трихлорэтан	360
5	Тетрахлорэтан	680
6	Синильная кислота	360
7	Винилхлорид	840
8	Фосген	180
9	Эфир	240

Аналогичные разработки ФСР для полевых видов работ ведутся и в России. Так, в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана в кооперации с рядом научно-исследовательских институтов разработан и создан типоряд мобильных Фурье-спектрографов среднего класса спектрального разрешения ($\delta\nu=4-8$ см⁻¹) с временем измерения около 1 с на оптический диапазон 7–13 мкм [8]. В качестве фотоприемного устройства применялся высокочувствительный охлаждаемый до 80 К фоторезистор, а для портативного варианта ФСР — неохлаждаемый пироэлектрический фотоприемник [9]. ФСР с охлаждаемым фотоприемником представляет собой автоматизированный комплекс, укомплектованный специализированной ЭВМ, электромеханической системой пространственного сканирования, высокочувствительным телевизионным визиром, монитором и пультом управления. Портативный вариант ФСР представляет собой малогабаритный прибор, работа которого осуществляется с рук. На рис. 3 и 4 представлены фотографии образцов ФСР.

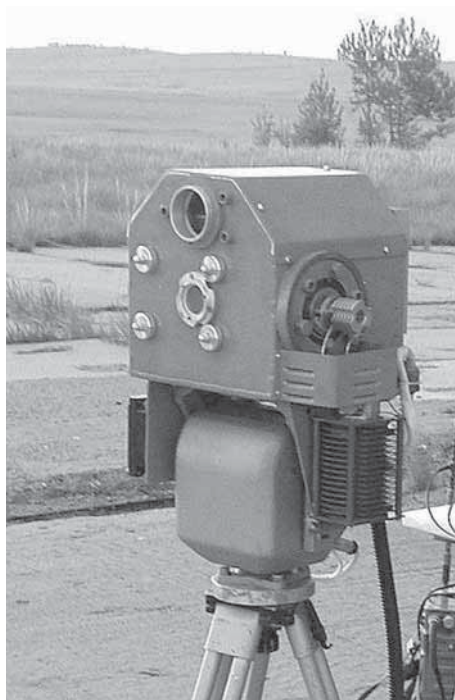


Рис. 3. Общий вид Фурье-спектрометра с охлаждаемым фотоприемником

Процедура обработки экспериментальных данных сводится к проведению двух последовательных процедур. Первая процедура — это идентификация вещества на основе статистических испытаний подобия спектров поглощения исследуемого вещества и эталонных спектров из заранее созданной базы спектральных данных. Вторая — вычисление интегральной концентрации вещества путем сравнения оптических толщин исследуемого и эталонного спектров. База спектральных данных (БСД) загрязняющих веществ является одним из основных компонентов программного обеспечения ФСП и создается, как правило, в лабораторных условиях с использованием оптических кювет. Только на основе БСД возможны проведение процедур идентификации и определение концентраций загрязняющих веществ.



Рис. 4. Общий вид портативного Фурье-спектрометра с неохлаждаемым пироэлектрическим фотоприемником

Наиболее полные спектры колебательно-вращательных переходов молекул, составляющих основу стандартной атмосферы, представлены в базах спектральных данных HITRAN [10] и GEISA [11]. База данных HITRAN создана специалистами отделения атомной и молекулярной физики Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (США) и предназначена для использования при моделировании поглощения и излучения атмосферы в различных диапазонах спектра. Разработанная в Политехнической школе (Франция) база спектральных данных GEISA содержит спектроскопическую информацию о молекулах химических веществ, содержащихся в атмосфере Земли и ряда планет Солнечной системы.

Одной из принципиальных проблем ФСР является наличие собственного фонового (приборного) излучения. Связано это с тем, что при пассивной регистрации величины спектральной мощности потока излучения, поступающие в ФСР со стороны входа и собственного фонового излучения, сравнимы между собой [12]. Это приводит к необходимости использования специальных процедур фазовой коррекции, без применения которых правильное восстановление экспериментального спектра невозможно [13].

Экспериментальная проверка ФСР с охлаждаемым фотоприемником проводилась в достаточно жестких условиях — ранним утром при минимальных яркостных контрастах трасс и продолжалась до полудня [14]. Мишенная обстановка (облако имитаторов ЗВ) создавалась с помощью специальной метательной машины с последующим принудительным распылом в воздухе вещества на высотах, не превышающих ~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 нескольких градусов по отношению к горизонту.

Так при длине трассы 500 м уверенно регистрировалось облако аммиака при его заряде всего в 80–90 г (0,4 л 20%-ного раствора аммиачной воды). Наблюдение облака велось 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 сочетаниях и с разными величинами концентраций. В табл. 2 приведены значения минимально обнаружимых концентраций различных веществ при температурном контрасте в 10 °С.

Таблица 2. Минимально обнаружимые концентрации, регистрируемые Фурье-спектрометрией с охлаждаемым фотоприемником, для единичного скана

№ п/п	Вещество	Полоса поглощения, см ⁻¹	Минимально обнаружимая концентрация, мг/м ²
1	Аммиак	965	2–3
2	Озон	1053	20
3	Диоксид серы	1135	200
4	Уксусный альдегид	1107	100
5	Метанол	1032	10–13
6	Этанол	1066	20
7	Ацетон	1205	90
8	Четыреххлористый углерод	793	20–25
9	Бензол	1035	130
10	Тетрахлорэтилен	916	20–30
11	Винилбромид	936	70
12	Окись этилена	869	15–20
13	Хлорбензол	1090	125
14	1,1,1-трихлорэтан	1086	30–35
15	1,4-диоксан	1133	80
16	Метилтретбутиловый эфир	1095	30

На трассе длиной 2,4 км при разовом распыле ~0,7 кг аммиачной воды облако аммиака непрерывно фиксировалось ФСР более 40 минут. Работа на трассах различной протяженности позволила определить минимально регистрируемые интегральные концентрации паров аммиака. Результаты экспериментов сведены в табл. 3, там же приведены и яркостные контрасты трасс, которые определялись с помощью панорамного тепловизора.

Таблица 3. Минимально обнаружимые концентрации паров аммиака в зависимости от длины трассы

Длина трассы, км	Минимально обнаружимая концентрация, мг/м ²	Температурный контраст трассы, К
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 ФСР при его размещении на легковом автомобиле и движении последнего со средней скоростью около 30–40 км/ч 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 30 с после создания мишенной обстановки начиналось движение автомобиля с включенным Фурье-спектрометром. На рис. 5 представлены результаты измерений интегральных концентраций аммиака при движении автомобиля с установленным на нем ФСР.

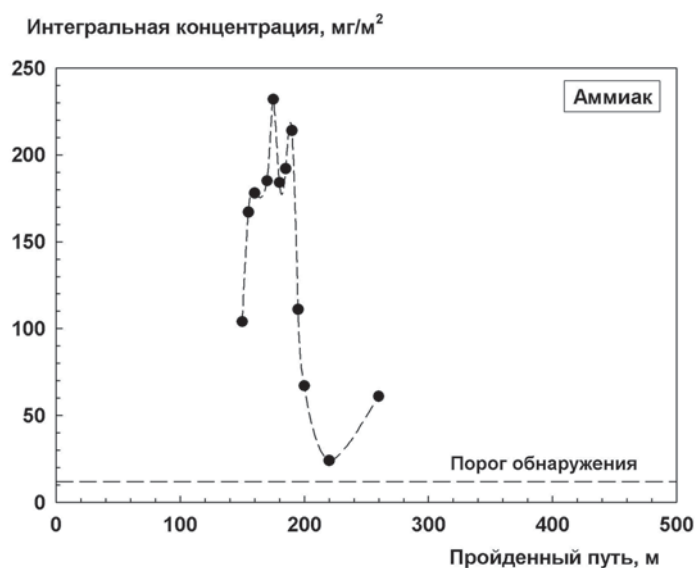


Рис. 5. Определение интегральной концентрации облака аммиака при работе Фурье-спектрометра с охлаждаемым фотоприемником на мобильном средстве в движении

ФСР был испытан на объектах ОАО «Газпром» для регистрации утечек метана на магистральных трубопроводах, газоперекачивающих станциях и газохранилищах. Испытания проводились в Московской области на газораспределительной станции (г. Троицк) и в подземном газохранилище (г. Щелково). В условиях открытых приземных трасс в дневное время была экспериментально продемонстрирована возможность обнаружения искусственно создаваемых и естественных утечек метана на фоне различных подстилающих поверхностей. Дальность успешного обнаружения варьировалась в пределах 50–500 м.

Ниже приводятся результаты полевых испытаний портативного ФСР с пироэлектрическим фотоприемником МГ-32 [15]. На дальности 500 м обнаружены модельные облака паров при распыле 4 и 8 л 20%-ного раствора аммиака, а также 8 л 50%-ных растворов метилового, этилового и изопропилового спиртов. При дальности 1000 м надежно регистрировались пары аммиака при распыле 16 л 20%-ного раствора.

На рис. 6 приведены зависимости измеренных концентраций аммиака (в $\text{мг}/\text{м}^3$) и коэффициента корреляции от времени при распыле 8 л 20%-ного раствора на расстоянии 500 м. Аналогичные зависимости получены при распыле 8 л 50%-ного раствора метилового спирта. Как следует из этих данных, на дальностях до 1000 м удается не только регистрировать сам факт наличия облака паров в открытой атмосфере, но и фиксировать изменение концентрации облака с течением времени.

На станции «Белорусская» Московского метрополитена проводились эксперименты по обнаружению распыляемого этанола. Портативный ФСР был испытан в режиме работы по специально организованной трассе длиной несколько десятков метров с активной подсветкой с помощью широкоапертурного ИК-излучателя (яркостная температура 310–320 К). При распылении с помощью ручной форсунки ~1 г этанола через 1–2 с наблюдалось срабатывание ФСР.

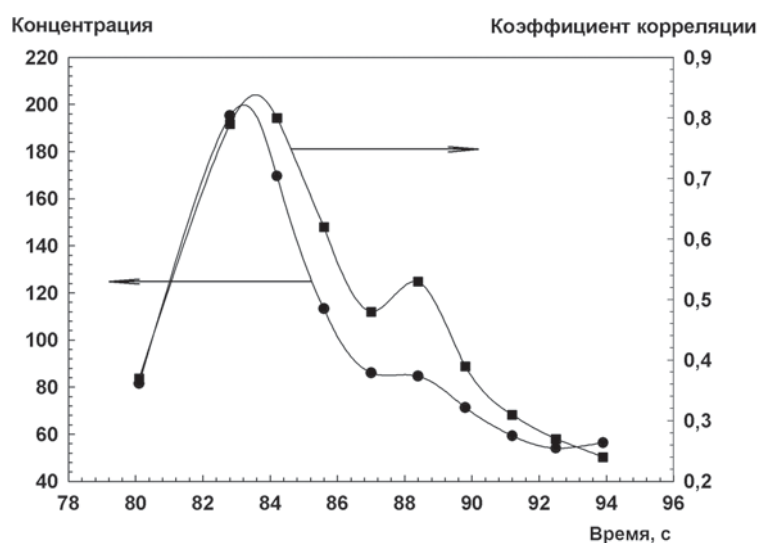


Рис. 6. Зависимость измеренной концентрации (в $\text{мг}/\text{м}^3$) и коэффициента корреляции от времени при распыле 8 л 20%-ного раствора аммиака на расстоянии 500 м от портативного Фурье-спектро радиометра

Таким образом, приведенные результаты работы по созданию приборов на базе Фурье-спектро радиометров показывают перспективность метода пассивной локации химических соединений в открытой атмосфере. Поиск, идентификация и определение концентраций химических соединений в режиме реального времени методом Фурье-спектро радиометрии на сегодняшний день является наиболее технически обоснованным и реально достижимым способом решения задач локального мониторинга атмосферы.

Список литературы

1. Белоусов И.И., Гаврилов В.А., Галанова Г.К. и др. Оптические приборы и методы определения газового состава воздуха и технического состояния газотранспортных систем // Оптический журнал. 1995. Т. 62, № 7. С. 44–54.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 550 с.
3. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы Фурье-спектрометрии. — М.: Наука, 2006. — 275 с.
4. Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию / Пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 382 с.
5. Сильверстейн Р., Басслер Н. Спектрометрическая идентификация органических соединений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 590 с.
6. Schildkraut E.R., Connors R.F. Standoff Wide Area Detection of SF₆ by Means of Passive IR Imaging Spectrometer. — Marlborough, MA: Block Engineering. 508/480-9643.
7. Beil A., Daum R., Harig R., Matz G. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry // Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3493. P. 32–43.
8. Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. Пассивная локация химических соединений в открытой атмосфере с помощью Фурье-спектрометра // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 8. С. 34–47.
9. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Н. Рождествина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 528 с.
10. Rothman L.S., Gamache R.R., Goldman A. et al. The HITRAN database 1986. // Appl. Optics. 1987. Vol. 26. P. 4058–4097.
11. Chédin A., Husson N., Scott N. A. et al. The GEISA data bank 1984 version. Internal Note LMD, № 127, February 1985, reviewed October 1986.
12. Shimoto A., Kobayashi H., Kadokura S. Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator // Appl. Optics. 1999. Vol. 38. P. 571–576.
13. Дворук С.К., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. и др. Обработка двусторонних интерферограмм с учетом собственного фонового излучения Фурье-спектрометра // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 93, № 5. С. 884–889.
14. Дворук С.К., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. и др. Мониторинг загрязняющих веществ в атмосфере с помощью Фурье-спектрометра // Оптический журнал. 2004. Т. 71, № 5. С. 7–13.
15. Дворук С.К., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. и др. Портативный Фурье-спектрометр с неохлаждаемым фотоприемником // Оптический журнал. 2006. Т. 73, № 11. С. 67–72.

PASSIVE REMOTE SENSING BY FTIR RADIOMETER

Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E.

In the article are given descriptions of the developed FTIR radiometers for the tasks of search, identification and determining the concentrations of vapors of chemical compounds in the open atmosphere by the method of passive location. Characteristics and experimental data of the field tests of the developed FTIR radiometers are given.