

Натурные испытания ИК-Фурье-спектрорадиометра для дистанционного зондирования атмосферы

12, декабрь 2013

DOI: 10.7463/1213.0669654

Константинов П. С., Алехнович В. И., Кулакова Н. Н., Подгузов Г. В.

УДК 543.421/.424

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

konstantinovps@gmail.com

vial@bmstu.ru

nnkulakova@gmail.com

png2000@mail.ru

Введение

В настоящее время важной задачей экомониторинга является дистанционное зондирование атмосферы (ДЗА) с целью обнаружения и идентификации токсичных веществ и поллютантов.

Лидирующее положение сегодня занимают оптические системы мониторинга [1]:

- лидарные комплексы (активная спектроскопия);
- Фурье-спектрометры (пассивная спектроскопия).

В данной статье приведены результаты натурных испытаний прототипа Фурье-спектрометра, разработанного ОАО «НПП «Геофизика-Космос».

1 Методика натурных испытаний

Принцип действия пассивных дистанционных газоанализаторов на основе ИК-ФСР основан на регистрации характеристических спектров излучения или поглощения загрязняющих веществ в инфракрасном (ИК) диапазоне. Фурье-спектрометры способны регистрировать тепловое излучение атмосферы, земли, зданий, растений, облаков, а также произвольную комбинацию этих излучений, прошедших через облако загрязнителя, и, кроме того, собственное тепловое излучение газов-загрязнителей.

Методологически изделие строится на основе метода пассивной дистанционной спектральной диагностики.

В этом способе измерений источником излучения является атмосфера или элементы ландшафта. Исследуемым объектом является загрязняющие газы на оптическом пути в атмосфере между источником излучения и приемником. Чувствительность метода не является постоянной величиной и возрастает при увеличении разности температур ΔT между объектом и источником излучения (фоном) [2].

Типичный предел детектирования химических веществ составляет величину порядка 1 ppm (при $\Delta T = 1$ К и размере облака порядка 1 м) [3].

Спектральный диапазон прибора – 7÷14 мкм. Он выбран, исходя из того, что в этом диапазоне находится «окно прозрачности» атмосферы (компоненты атмосферы не имеют линий поглощения или излучения) и линии спектра основных интересующих нас загрязнителей [4].

Исходными данными для определения интегрального содержания вещества-мишени служат три экспериментальных спектра [7].

- 1) “Чистый” спектр фона. Представляет собой не просто спектр удаленного фонового объекта, а спектр, зарегистрированный точно в тех же условиях, в которых в дальнейшем предполагается регистрировать спектр вещества-мишени. Например, если концентрация вещества-мишени будет измеряться в спектрометрической кювете на фоне нагретого черного тела, то “чистым” фоновым спектром будет спектр этого черного тела, зарегистрированный сквозь пустую кювету. В дальнейшем расположение прибора, черного тела и кюветы не должно меняться. Тем самым автоматически окажется учтено влияние окон кюветы, а также естественных поглотителей излучения, которые присутствуют в окружающей атмосфере (вода, углекислый газ).
- 2) Спектр вещества-мишени. Регистрируется точно в тех же условиях, что и предыдущий, фоновый спектр. Вещество-мишень может быть распределено вдоль трассы измерения произвольным образом. Например, в кювете вещество занимает ограниченный объем и его концентрация в этом объеме постоянна; в случае открытого облака вещества-мишени его объем ничем не ограничен, а концентрация вдоль трассы измерения меняется.
- 3) Спектр черного тела, имеющего температуру газа-мишени. Обычно, как открытое облако вещества, так и спектрометрическая кювета, имеют температуру окружающей атмосферы. В этом случае используемое для регистрации третьего спектра черное тело может быть не очень качественным – на практике достаточно записать спектр любого объекта с пористой матовой поверхностью (например, листа картона).

В октябре 2010 года были проведены натурные испытания прототипа Фурье-спектрометра. Основной целью испытаний было определение работоспособности изделия, воспроизводимости экспериментальных результатов по идентификации и определению интегральных содержаний исследуемых веществ, в качестве которых использовались пары аммиака, шестифтористая сера и др., на различном фоне. При этом исследуемое вещество находилось в кювете. Для измерений спектров на фоне неба использовалось специальное зеркало с алюминиевым слоем и защитным покрытием.

Функциональная схема и внешний вид полевого экспериментального стенда представлены на рис. 1, 2.

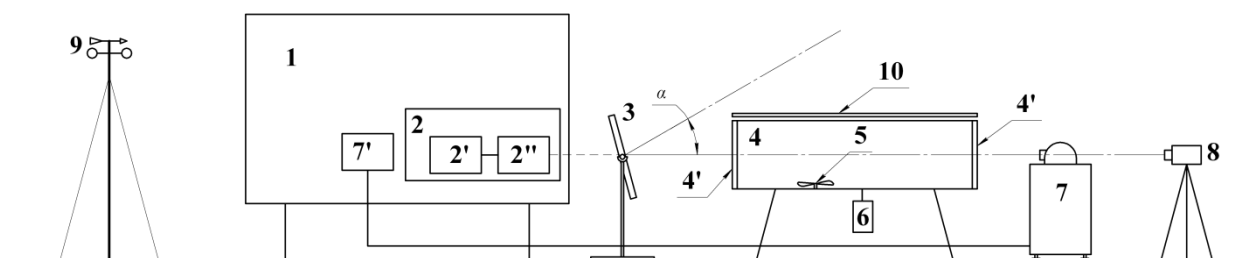


Рис. 1 Функциональная схема полевого экспериментального стенда

1 - специальный контейнер (КУНГ) для размещения эталонного абсолютно черного тела (АЧТ) и терминала управления прототипа Фурье-спектрометра ПФС-01; **2** – эталонное АЧТ (**2'** - криотермостат жидкостный LOIPFT-311-80 с температурным диапазоном от -80 до 100°C; **2''** - полый тепловой излучатель ИРЭ-210.50 с апертурой 380 мм); **3** – зеркало для изменения угла зондирования α к горизонту (600 мм×600 мм, подложка - стекло, отражающий слой – Al с защитным покрытием); **4** – кювета (**4'** – съемные окна из полиэтиленовой пленки толщиной 7 мкм); **5** – вентилятор для равномерного распределения газов и паров исследуемых соединений; **6** – система напуска газов и паров исследуемых соединений; **8** – газоанализатор переносной АСТРА-СВ (электрохимический сенсор на пары аммиака с диапазоном измеряемых концентраций от 0 до 300 мг/м³); **7** - ИК-Фурье-спектрометр ПФС-01 (**7'** – терминал управления ПФС-01, ноутбук); **8** – тепловизор «VarioCAMhr» (детектор – неохлаждаемая микроболометрическая матрица – FPA - 640×480 пикселей, спектральный диапазон - 8÷12 мкм, объектив - $f'=30$ мм, IFOV=0,8 мрад, FOV=30°×23°; температурное разрешение ~0,08 К, точность абсолютного измерения температуры ±1,5К); **9** – комплект метеорологический полевой КМП-5 (измерения направления и скорости ветра, температуры, давления и влажности); **10** - теплозащитный экран

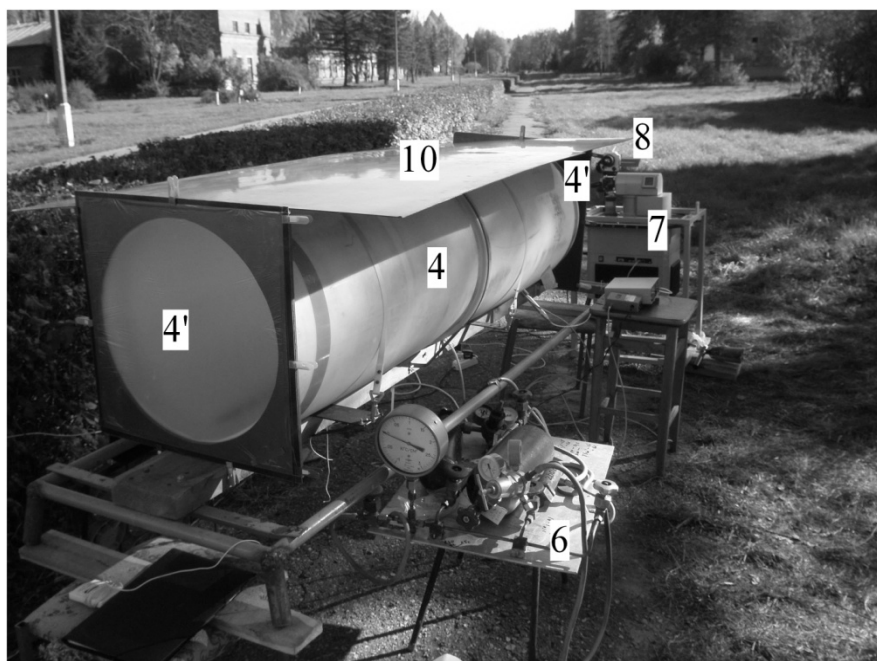


Рис. 2 Полевой экспериментальный стенд (нумерация аналогична приведенной на рис 1)
4 – кювета (**4'** – съемные окна из полиэтиленовой пленки толщиной 7 мкм); **7** – система напуска газов и паров исследуемых соединений; **8** – газоанализатор переносной АСТРА-СВ; **9** – газоанализатор переносной КОЛИОН-1В-04; **10** – ИК-Фурье-спектро радиометр ПФС-01; **11** – тепловизор «VarioCAMhr»; **13** – теплозащитный экран

В качестве тест-объектов использовались пленки различной толщины, изготовленные из полимерных материалов. Пленки устанавливались непосредственно перед входным окном спектро радиометра.

Использование полимерных пленок в качестве тест-объектов позволяет проверить работоспособность и провести оценку аналитических возможностей испытуемого устройства [1].

Предварительная проверка работоспособности проводилась следующим образом.

- 1) Регистрация спектра встроенного в изделие абсолютно черного тела (далее АЧТ) при температуре окружающей среды (и изделия).
- 2) Температура АЧТ устанавливается на 10°С больше температуры окружающей среды (изделия).
- 3) Образец полимерной пленки известной толщины устанавливается между входным окном спектро радиометра и окном встроенного АЧТ, производится регистрация спектра.
- 4) По результатам обработки полученных спектров определяют толщину пленки путем сравнения ее измеренного спектра с эталонным спектром [5]. При различии полученного и известного значений толщины пленки не более 10÷20% испытуемое изделие можно считать готовым к проведению дальнейших измерений.

Оценка аналитических возможностей спектрорадиометра выполнялась следующим образом.

- 1) Измеряется калибровочный спектр модели АЧТ, имеющего температуру примерно на 20 градусов ниже температуры окружающей атмосферы, с усреднением по 256 индивидуальным спектрам.
- 2) Измеряется калибровочный спектр встроенного АЧТ, имеющего температуру примерно на 20 градусов ниже температуры окружающей атмосферы, с усреднением по 256 индивидуальным спектрам.
- 3) Измеряется спектр модели АЧТ, имеющего температуру окружающей атмосферы, с усреднением по 256 индивидуальным спектрам.
- 4) Измеряется спектр встроенного АЧТ, имеющего температуру окружающей атмосферы, с усреднением по 256 индивидуальным спектрам.
- 5) Линия визирования испытуемого изделия направляется на необходимый фоновый объект (эталонное АЧТ) или естественный фон с помощью специального зеркала (поз. 3 на рис. 1) и измеряется спектр фона с усреднением по 256 индивидуальным спектрам.
- 6) Создается стационарный поток газа через кювету с открытыми окнами и измеряются спектры с различным числом усреднений индивидуальных спектров (среди них как минимум один с максимальным числом усреднений 256).
- 7) Изменение концентрации газа в кювете в ходе испытаний регистрируется с использованием контрольных локальных датчиков.

Калибровочные спектры в операциях 1 (или 2) и 3 (или 4) не обязательно измерять при каждом изменении фонового объекта, но их регистрацию необходимо повторять не реже, чем раз в 15–30 минут в связи с возможными изменениями температуры прибора и окружающей атмосферы.

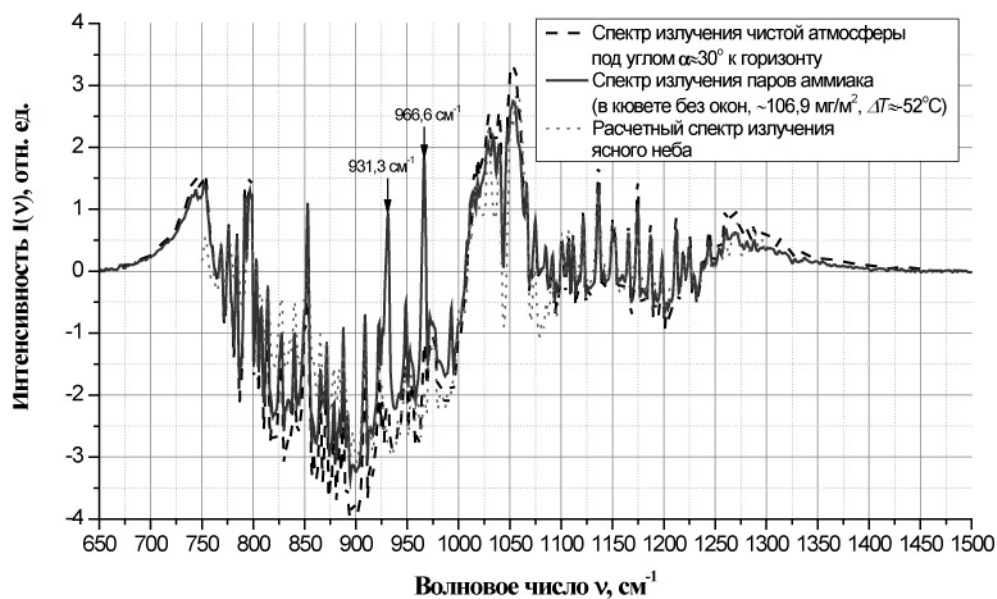
Концентрация вещества-мишени определяется, исходя из зарегистрированного ранее (или рассчитанного) спектра фона и спектра вещества-мишени.

Для оценки эффективности алгоритма расчета фонового спектра результаты сравниваются между собой.

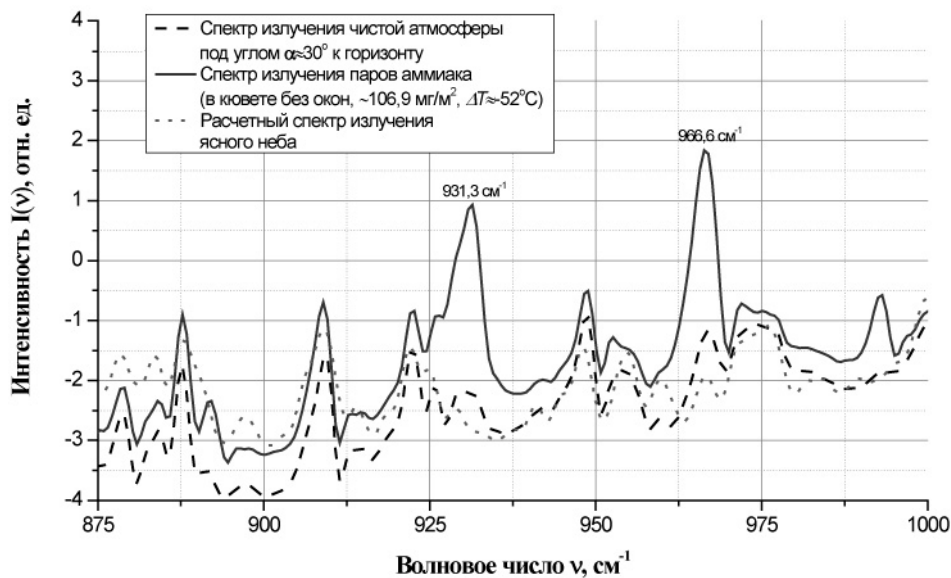
Для изменения концентрации газа в кювете используют изменение интенсивности контролируемого потока испытуемого газа из его источника (баллона). За минимально обнаруживаемую концентрацию принимается такая концентрация, при которой расхождение значений, полученных с помощью испытуемого изделия и контрольного датчика, начинают различаться более чем на 50%.

Зондирование кюветы проводится при различных углах наблюдения по отношению к горизонту с помощью специального зеркала. В качестве фоновых объектов используются следующие подстилающие поверхности: ясное безоблачное небо, сплошная низкая облачность, нагретые солнцем поверхности топографических объектов.

Для практического применения наиболее интересным является случай, когда фоном является ясное небо. В качестве тест-объекта использовались пары аммиака. Перед созданием облака паров аммиака в кювете был записан спектр излучения атмосферы под углом 30° к горизонту. Затем в кювету помещалась чашка Петри, в которую был налит водный раствор аммиака 20%. В кювете находился вентилятор, который обеспечивал равномерное распространение паров аммиака в сечении кюветы. В результате были получены спектры, приведенные на рис. 3 (а, б)



а)



б)

Рис. 3 Спектры излучения чистой атмосферы под углом $\alpha \approx 30^\circ$ к горизонту ($\Delta T \approx -52^\circ\text{C}$) и паров аммиака в кювете с открытыми окнами с интегральным содержанием $\sim 106,9 \text{ мг/м}^2$ на фоне безоблачного неба в широком спектральном диапазоне (а) и в узком спектральном диапазоне (б)

Кроме того на рисунках представлены экспериментальный и расчетный спектры излучения атмосферы под углом 30° к горизонту.

На рисунке отчетливо видны линии излучения аммиака на фоне ясного неба. Эти результаты позволяют с достаточной точностью определить интегральное содержание аммиака в кювете или атмосфере (в случае открытых окон кюветы).

2 Результаты

В результате анализа полученных спектров вещества-мишени с использованием зарегистрированного фонового спектра и расчетного фонового спектра были получены значения интегрального содержания паров аммиака в атмосфере, приведенные в таблице.

Таблица «Результаты измерения интегрального содержания аммиака»

№ измерения	Температура фона, °С (по данным тепловизора)	Содержание паров аммиака, мг/м ² (по данным сенсора АСТРА-СВ)	Интегральное содержание паров аммиака, вычисленное с использованием реального фонового спектра		Интегральное содержание паров аммиака, вычисленное с использованием расчетного спектра	
			Интегральное содержание, мг/м ²	Коэффициент корреляции	Интегральное содержание, мг/м ²	Коэффициент корреляции
1	-34,6	34	174,50	0,88	143,29	0,72
2	-33,3	356	160,75	0,95	148,89	0,71
3	-37,0	284	128,90	0,88	109,11	0,62
4	-37,5	344	70,03	0,74	60,88	0,43
5	-39,6	98	93,10	0,94	94,04	0,55
6	-39,8	86	50,40	0,87	58,11	0,41
7	-40,5	232	72,08	0,93	80,06	0,50
8	-40,1	384	53,27	0,92	62,73	0,43
9	-40,3	318	83,14	0,92	86,57	0,53
10	-39,5	210	77,39	0,90	77,67	0,50
11	-40,5	132	69,34	0,86	68,21	0,46
12	-40,1	104	0,00	0,04	0,00	0,17
13	-40,3	122	44,66	0,45	36,16	0,31
14	-39,5	94	38,53	0,39	29,91	0,28

Нестабильность показаний, как локального датчика, так и испытуемого прибора связана с тем, что облако паров аммиака находилось в ничем не ограниченном объеме (в кювете с открытыми окнами). Следовательно, на результаты измерений могли повлиять порывы ветра, неравномерность распределения облака вдоль оптического пути (не зная оптического пути, невозможно точно пересчитать концентрацию в интегральное содержание и наоборот).

Также при проведении эксперимента использовался тепловизор «VarioCAMhr» [6]. Следует отметить симбатность уменьшения интегрального содержания аммиака и температуры, измеряемой тепловизором вдоль трассы зондирования.

Выводы

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и высокую надежность прототипа ИК-Фурье-спектрорадиометра.

Различие интегральных содержаний паров аммиака по данным локального сенсора и дистанционного Фурье-спектрорадиометра, как с использованием фонового спектра (излучение неба), так и без него можно объяснить следующим образом. Резкое изменение интегрального содержания аммиака по данным сенсора ($34\div 384$ мг/м²) обусловлено пульсациями направления и скорости ветра в условиях эксперимента (при открытых окнах кюветы). Измеренные интегральные содержания аммиака с помощью испытуемого изделия при использовании фонового спектра в алгоритме обработки спектральных данных ($0\div 174,5$ мг/м²) являются более достоверными (средний коэффициент корреляции $\sim 0,76$) по сравнению с алгоритмом без использования фонового спектра (средний коэффициент корреляции $\sim 0,47$).

Список литературы:

1. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы Фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2006. 275 с.
2. Белл Р.Дж. Введение в фурье-спектроскопию: пер. с англ. М.: Мир, 1975. 380 с.
3. Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Погрешности одновременного определения содержания ряда атмосферных газов по наземным измерениям теплового ИК-излучения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35, № 2. С. 215-221.
4. МакКартни Э. Оптика атмосферы: пер. с англ. М.: Мир, 1979. 448 с.
5. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-спектры комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения полимеров. М.: Физматлит, 2001. 656 с.
6. Dennis F. Flanigan Hazardous cloud imaging: a new way of using passive infrared // Applied Optics. 1997. Vol. 36, no. 27. P. 7027-7036.
7. Beil A., Daum R., Matz G., Harig R. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry // Spectroscopic Atmospheric Environmental Monitoring Techniques / K. Schäfer, ed. Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3493. P. 32-43.

Full scale tests of an IR Fourier spectral-radiometer for remote atmospheric sounding

12, December 2013

DOI: 10.7463/1213.0669654

Konstantinov P.S., Alehnovich V.I., Kulakova N.N., Podguzov G.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

konstantinovps@gmail.com

vial@bmstu.ru

[nnkulakova@gmail.com](mailto:nkulakova@gmail.com)

png2000@mail.ru

This article describes full-scale tests of a prototype of a IR Fourier spectral-radiometer for remote atmospheric sounding. The article presents an experimental procedure, which would allow one to determine the efficiency of the device and its metrological characteristics. Additionally, the article presents results of tests with the use of test objects such as films made of different polymer compounds (polyester, Teflon, polyethylene, polystyrene) with known thickness, as well as vapor of ammonia (NH₃) and sulfur hexafluoride (SF₆) in gaseous phase. The spectra of test objects were registered against various background objects - a clear sky, a cloudy sky, a model of a black body with a known temperature.

Publications with keywords: [test](#), [remote sensing of atmosphere](#), [Fourier transform spectroradiometer](#)

Publications with words: [test](#), [remote sensing of atmosphere](#), [Fourier transform spectroradiometer](#)

References

1. Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. *Osnovy Fur'e-spektroradiometrii* [Fundamentals of Fourier spectroradiometry]. Moscow, Nauka, 2006. 275 p.
2. Bell R.J. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*. New York, Academic Press, 1972. (Russ. ed.: Bell R.J. *Vvedenie v fur'e-spektroskopiyu*. Moscow, Mir, 1975. 380 p.).
3. Virolaynen Ya.A., Polyakov A.V., Timofeev Yu.M. Pogreshnosti odnovremennogo opredeleniya sodержaniya ryada atmosferykh gazov po nazemnym izmereniyam teplovogo IK-izlucheniya [Errors in the Simultaneous Determination of a Series of Atmospheric Minor Gases from Ground-Based Measurements of Thermal IR Radiation]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i*

- okeana*, 1999, vol. 35, no. 2, pp. 215-221. (English translation: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1999, vol. 35, no. 2, pp. 195-200).
4. McCartney E.J. *Optics of the atmosphere*. N.Y., Willey, 1977. 400 p. (Russ. ed.: McCartney E.J. *Optika atmosfery*. Moscow, Mir, 1979. 448 p.).
5. Kuptsov A.Kh., Zhizhin G.N. *Fur'e-spektry kombinatsionnogo rasseyaniya i infrakrasnogo pogloshcheniya polimerov* [Fourier-spectra of the Raman scattering and infrared absorption of polymers]. Moscow, Fizmatlit, 2001. 656 p.
6. Dennis F. Flanigan Hazardous cloud imaging: a new way of using passive infrared. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 27, pp. 7027-7036.
7. Beil A., Daum R., Matz G., Harig R. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry. In: Schafer K., ed. *Spectroscopic Atmospheric Environmental Monitoring Techniques*. Proceedings of SPIE, 1998, vol. 3493, pp. 32-43.