

УДК 681.785.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАНОРАМНОГО ИНФРАКРАСНОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРА

**С.В. Башкин¹, А.Ю. Бойко², В.Н. Корниенко¹, И.В. Кочиков³,
М.В. Лельков¹, А.И. Миронов¹, А.Н. Морозов¹, А.А. Позвонков²,
А.С. Самородов², С.И. Светличный⁴, С.Е. Табалин¹,
И.Л. Фуфурин¹, П.Е. Шлыгин²**

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: amor59@mail.ru; igfil@mail.ru

²33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт МО РФ,
Вольск-18, Российская Федерация
e-mail: shlygin.pe@mail.ru

³Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация
e-mail: igor@kochikov.ru

⁴Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН
им. В.Л. Гальперна, Черноголовка, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: svetl@biner.ac.ru

Рассмотрена конструкция и принцип действия панорамного инфракрасного фурье-спектрометра. Приведены основные технические характеристики прибора. Описана методика визуализации обнаруженного облака паров вещества. Приведены результаты экспериментальных исследований панорамного инфракрасного фурье-спектрометра, на основании которых исследована динамика движения облака паров вещества, оценена его угловая и линейная скорости, а также получены данные по распространению облака и изменению его угловых размеров в воздушной среде. Приведена методика анализа данных, получаемых с двух инфракрасных фурье-спектрометров, с учетом которых можно оценить размеры облака и расстояние от каждого прибора до облака. Показано, что результаты обнаружения облака паров вещества с помощью панорамного инфракрасного фурье-спектрометра могут быть использованы для прогнозирования распространения исследуемого вещества в пространстве.

Ключевые слова: панорамный фурье-спектрометр, ИК фурье-спектроскопия, беспроботборный, газоанализ, идентификация, топография.

EXPERIMENTAL RESULTS OF INVESTIGATING PANORAMIC FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROMETER

**S.V. Bashkin¹, A.Yu. Boyko², V.N. Kornienko¹, I.V. Kochikov³,
M.V. Lelkov¹, A.I. Mironov¹, A.N. Morozov¹, A.A. Pozvonkov²,
A.S. Samorodov², S.I. Svetlichnyi⁴, S.E. Tabalin¹, I.L. Fufurin¹,
P.E. Shlygin²**

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: amor59@mail.ru; igfil@mail.ru

²The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense
of the Russian Federation, Volsk-18, Russian Federation
e-mail: shlygin.pe@mail.ru

³Centre of Applied Physics, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russian Federation
e-mail: igor@kochikov.ru

⁴The Branch of Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics,
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russian Federation
e-mail: svetl@binep.ac.ru

The research deals with the design and the principle of operation of a panoramic Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer. In this work we give the main technical characteristics of the device and describe the visualization technique of the detected pollutant cloud. Thus, we carried out experimental studies into panoramic FTIR spectrometer and on its basis we examined dynamics of the pollutant cloud movement. Moreover, we estimated its angular and linear speed, and obtained data on diffusion distribution of the cloud. The analysis of the data collected on two panoramic FTIR spectrometers gives the possibility to estimate the size of the cloud and calculate the distance from each device. It is shown that results of a pollutant cloud detection by means of panoramic FTIR spectrometer can be used for forecasting the behavior of the investigated pollutants in the atmosphere.

Keywords: panoramic FTIR spectrometer, FTIR spectroscopy, remote sensing, gas analysis, identification, topography.

Введение. В настоящее время спектроскопия — один из наиболее распространенных методов исследования строения вещества, охватывающих самые различные области применения [1–3]. Инфракрасная фурье-спектроскопия является широко используемым в современной практике методом анализа веществ как для лабораторных рутинных исследований [4], так и для внелабораторного газового анализа [5, 6]. Сегодня на базе инфракрасных фурье-спектрорадиометров (ИК ФСР) разработаны автоматизированные системы беспробоотборной идентификации веществ в полевых условиях [7–12]. Существенным развитием подобных систем является использование в конструкции фурье-спектрометра многоплощадочного фотоприемного устройства, что дает возможность создавать панорамные ФСР, позволяющие проводить сканирование воздушной среды в широком телесном угле одновременно в нескольких направлениях [13–15].

По назначению панорамный ИК ФСР [14, 15] является газосигнализатором и позволяет проводить спектральный анализ как в активном режиме с использованием внешней подсветки, так и в пассивном режиме. Прототипы панорамного ИК ФСР — фурье-спектрорадиометры с криостатируемым фотоприемным устройством [1, 5, 9], а также ФСР с неохлаждаемыми пироприемниками [7].

Разработанный прибор предназначен для дистанционного обнаружения и идентификации химических соединений в воздушной среде

в режиме реального времени на дальностях до нескольких километров. Применение в конструкции прибора многоэлементного фотоприемного устройства позволяет значительно расширить мгновенное поле зрения по отношению к прототипам и получать за одно измерение двумерное распределение исследуемого вещества в телесном угле ИК-канала.

Панорамный ИК ФСР предназначен для мониторинга воздушной среды на стационарных объектах, а также во внелабораторных и полевых условиях в режиме реального времени. Вследствие использования электромеханической поворотной платформы прибор может осуществлять сканирование трасс в диапазонах значений угла $0^\circ \dots 360^\circ$ по азимуту и $-15^\circ \dots +40^\circ$ по углу места. Для указанных углов сканирования возможно как ручное наведение на интересующее направление, так и программное задание интересующего сектора сканирования. Основные технические характеристики прибора приведены ниже:

Быстродействие, с	1
Рабочий спектральный диапазон, см^{-1}	700... 1400
Спектральное разрешение, см^{-1}	4,0
Число веществ в базе данных	Не менее 50

Применение двух и более панорамных ИК ФСР позволяет определить расстояние от места расположения прибора до облака паров веществ, оценить размеры облака и высоту, на которой оно находится [16]. Данные по перемещению облака в телесном угле ИК-канала прибора предполагается использовать для сопровождения облака в ручном режиме, а в перспективе для создания автоматических алгоритмов сопровождения облака паров.

Конструкция панорамного ИК ФСР. Прибор (рис. 1) состоит из оптико-механического блока 1, включающего в себя интерферометр Майкельсона с подвижным зеркалом, многоэлементное фотоприемное устройство, цифровую видеокамеру и портативную ЭВМ для управления прибором и анализа данных; поворотной платформы 2, осуществляющей позиционирование оптико-механического блока и выдающей текущие угловые координаты; блока управления и индикации 3. Блок управления и индикации представляет собой герметичный кейс, в который входит ноутбук, источник питания и джойстик управления поворотной платформой. Ноутбук предназначен для сбора данных об обнаружении вещества, визуализации двумерной картины распределения вещества с одновременным наложением на видеоряд (рис. 2) и передачи информации об обнаружении и угловых координатах внешнему потребителю. Конструкция многоплощадочного фотоприемного устройства приведена на рис. 3.



Рис. 1. Внешний вид панорамного ИК ФСТ:

1 — оптико-механический блок; 2 — поворотная платформа; 3 — блок управления и индикации

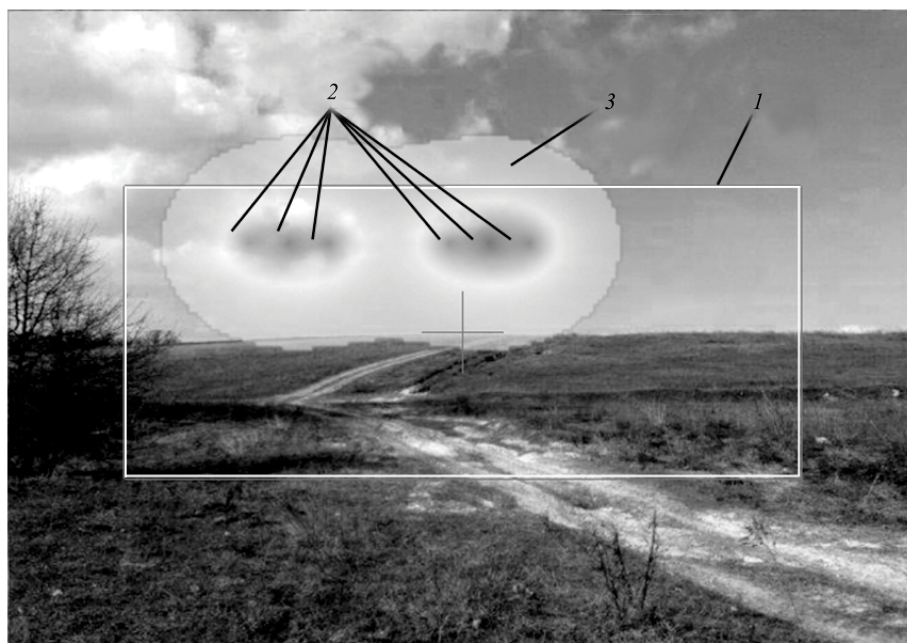


Рис. 2. Визуализация обнаружения облака паров вещества с помощью панорамного ИК ФСТ (облако отображается поверх видеоряда местности):

1 — прямоугольник; 2 — фокусы; 3 — визуальное представление облака паров вещества

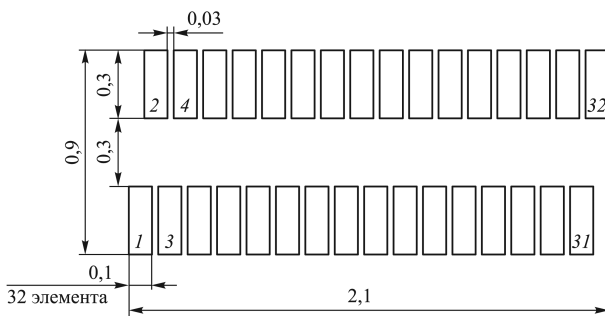


Рис. 3. Конструкция многоплощадочного фотоприемного устройства

Фотоприемник представляет собой многоэлементный кадмий-ртуть-теллуриевый фоторезистор с рабочей температурой криостатирования 80 К. Граничные размеры фоточувствительной площадки приемника составляют $2,1 \times 0,9$ мм. Каждый элемент (32 шт.) имеет размеры $0,1 \times 0,3$ мм. Площадки фотоприемника расположены в две линейки по 16 элементов в каждой (см. рис. 3). Телесный угол ИК-канала ФСР составляет $14^\circ \times 6^\circ$ по азимуту и углу места и разбивается на 32 канала согласно топологии фотоприемника. Обнаружение искомого вещества проводится отдельно по каждому каналу путем сравнительного статистического анализа экспериментальных данных с базой данных эталонных спектров. При обнаружении исследуемого вещества выдается информация о его идентификации, надежности обнаружения, интегральной концентрации и угловых координатах. Данные об обнаружении и идентификации веществ по каждому каналу фотоприемника поступают в блок управления и индикации ИК ФСР для последующей обработки и представления данных в наглядном виде.

Визуализация результатов измерений. Для улучшения визуального восприятия данных спектрального анализа, полученных на панорамном ИК ФСР, результаты обнаружения веществ накладывались на видеоряд с телевизионной камеры, входящей в состав оптико-механического блока. Поскольку видеокамера оснащена трансфокатором, позволяющим менять угловое поле зрения, для оценки размеров углового сектора ИК-канала на видеоряд накладывался прямоугольник, в центре которого располагается перекрестие, выполняющее роль прицела. Горизонтальные размеры кадра и прямоугольника соотносятся так же, как и азимутальные угловые размеры видео- и ИК-каналов спектрорадиометра. Отношение сторон прямоугольника соответствует отношению сторон многоплощадочного фотоприемника (см. рис. 3).

Если в процессе работы прибор не обнаруживал никаких веществ, то фон прямоугольника оставался прозрачным. В случае обнаружения

вещества на одном или нескольких пикселях фотоприемника, соответствующие секторы закрашивались, сигнализируя о нахождении исследуемого вещества в конкретной части углового поля ИК-канала. Для более естественного восприятия формы и конфигурации облака паров вещества использовалась заливка кадра в цветах RGB, где ярко красный цвет соответствует коэффициенту корреляции при обнаружении вещества, равному $r = 1$, и спектрально плавно окраска изменялась до светло-желтого цвета, соответствующего значению коэффициента $r = 0,3$.

Для представления “естественного” распределения концентрации вещества в облаке использовалась модель диффузного распределения концентраций вещества от “источника”, находящегося в центре соответствующего пикселя фотоприемника, до краев видеокadra по закону Гаусса

$$O_{i,j} = r[i_0, j_0] \exp \left[-\frac{(i - i_0)^2}{r_x^2} - \frac{(j - j_0)^2}{r_y^2} \right],$$

где i, j — текущие экранные координаты; i_0, j_0 — экранные координаты, соответствующие центру рассматриваемого пикселя; $r[i_0, j_0]$ — коэффициент корреляции, полученный по данным, которые зарегистрированы на рассматриваемом пикселе с координатами i_0, j_0 ; $O_{i,j}$ — концентрация вещества в точке с экранными координатами i, j , преобразованная в цвета RGB; r_x, r_y — радиусы диффузного распространения вещества в облаке от “источника”, соответствующего пикселю i_0, j_0 .

Однако необходимо учесть, что при обнаружении паров вещества сразу для нескольких пикселей вклад в цветовую окраску кадра происходил от каждого пикселя независимо. В рассмотренном примере отображения обнаруженного облака паров вещества (см. рис. 2) сработали пиксели № 6, 8, 10, 16, 18, 20 (см. рис. 3), а значения коэффициентов корреляции равны 0,69; 0,87; 0,79; 0,72; 0,89; 0,82 соответственно. Прямоугольник 1 (см. рис. 2) описывает ИК-канал относительно телесного угла видеокамеры. Фокусы 2 показывают центры пикселей, для которых произошло обнаружение вещества.

Позиционирование облака по результатам работы двух панорамных ИК ФСР. Используя информацию, полученную при обнаружении и идентификации облака паров вещества от двух панорамных ИК ФСР, а также их абсолютные координаты расположения на местности, можно с помощью триангуляции провести позиционирование облака на топографической карте местности, определить положение “центра” облака, его характерные размеры и расстояние от каждого

прибора до центра облака. По результатам обработки данных, поступавших в хронологическом порядке, становится возможным проследить динамику движения облака и сделать прогноз по распространению облака индицируемого вещества над местностью.

Один из возможных методов позиционирования облака и определения его размеров показан на рис. 4. Оси $S_1 X Z$ располагаются в горизонтальной плоскости и служат для позиционирования точки на топографической карте местности. Точки S_1 и S_2 определяют положение двух приборов; единичные векторы $\vec{e}_i^{\text{л}}$, $\vec{e}_i^{\text{п}}$ задают направление сканирования для крайних левых и правых пикселей многоплощадочного фотоприемника ИК ФСР с номерами $i = 1, 2$, для которых произошло обнаружение исследуемого вещества. Точка O характеризует “центр” облака, положение точек $ABCD$ позволяет оценить размер облака. Расстояния OS_1 и OS_2 характеризуют дальности обнаруженного облака от каждого прибора.

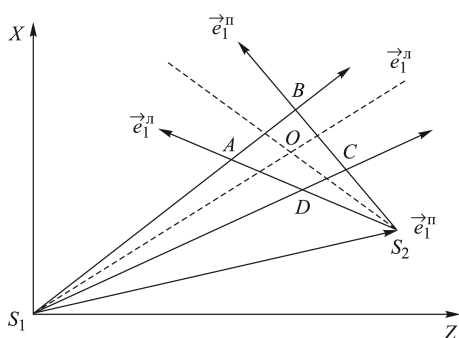


Рис. 4. Метод позиционирования облака паров вещества по данным двух панорамных ИК ФСР

Безусловно, описанный подход позволяет оценить размеры и определить “центр” облака только тогда, когда облако невелико и умещается в угловом поле ИК-каналов двух приборов. Во всех других случаях удастся зафиксировать лишь часть облака, однако сканирование пространства по азимуту и последующая хронологическая обработка получаемой информации позволяет вычислить реальные размеры облака и отследить динамику его поведения.

Результаты обнаружения облака вещества по результатам сканирования двух ИК ФСР с отображением на топографической карте местности представлены на рис. 5. Накопление индикационных данных в хронологическом порядке с наложением на карту местности позволит оценить динамику распространения облака на местности.

Результаты экспериментальных исследований панорамного ИК ФСР. Эксперименты с использованием панорамного ИК ФСР проходили в полевых условиях в летний период времени. Цель вне-лабораторных экспериментов — обнаружение одного или нескольких облаков паров вещества в открытой атмосфере с помощью двух панорамных ИК ФСР; визуальное представление получаемой информации; определение расстояния от прибора до облака паров вещества; определение скорости и направления распространения облака на местности.

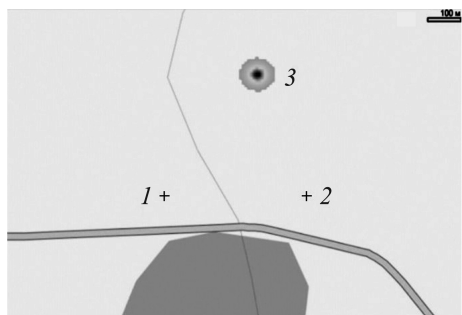


Рис. 5. Результаты обнаружения облака паров вещества по результатам сканирования двух панорамных ИК ФСР с отображением на топографической карте местности:

1, 2 — положение приборов; 3 — облако паров вещества

Два панорамных ИК ФСР располагались на расстоянии 400 м друг от друга (см. рис. 5). В качестве исследуемого вещества использовался аммиак, переводимый в газовую фазу путем распыла емкости, содержащей 20 %-ный раствор вещества. В ходе экспериментов зафиксировано перемещение двух облаков вещества в телесном угле ИК-канала ФСР, что позволило оценить угловую и линейную скорости движения облака и определить направление его движения.

Визуализация представлении информации об обнаружении облака паров аммиака на панорамном ИК ФСР показана на рис. 6, хронология движения двух облаков паров аммиака — на рис. 7. Белые ячейки обозначают пиксели матричного фотоприемника, для которых не произошло обнаружения исследуемого вещества, черные ячейки — пиксели, на которых произошло обнаружение и идентификация исследуемого вещества. Для каждой матрицы приведено текущее время регистрации.

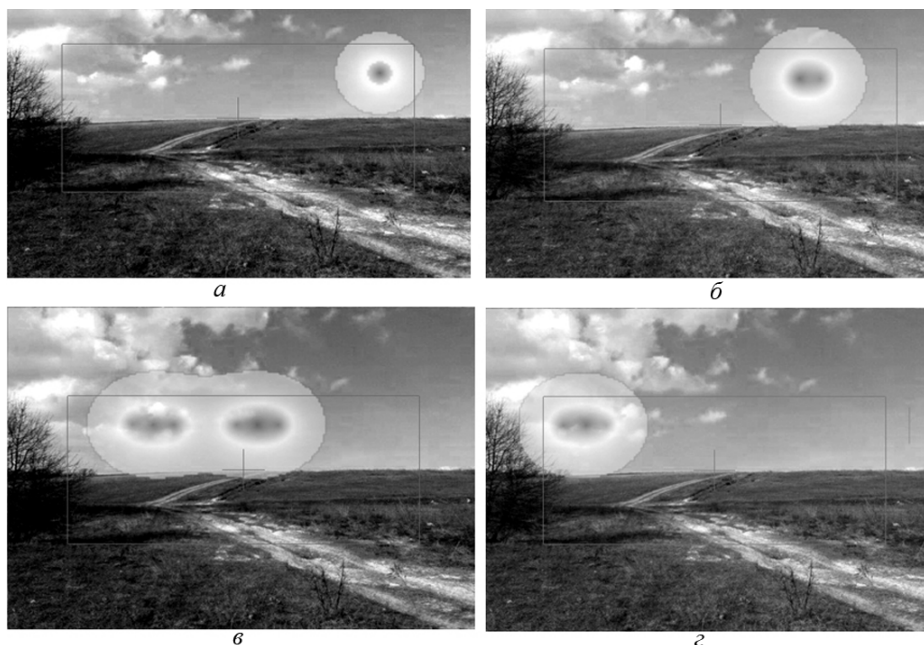


Рис. 6. Визуальное представление информации об обнаружении облака паров аммиака на панорамном ИК ФСР, соответствующее времени наблюдения 05°51'45" (а), +7" (б), +30" (в) и +37" (г)

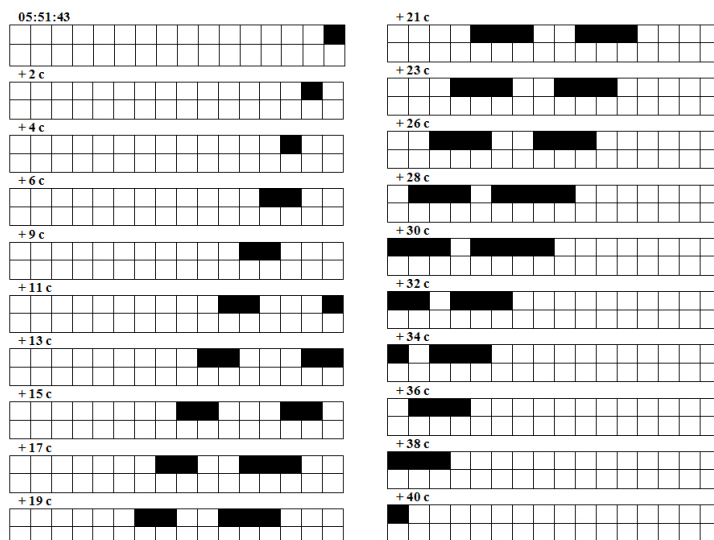


Рис. 7. Хронология движения двух облаков паров аммиака в апертуре ИК ФСР (над каждой матрицей, соответствующей многоплощадочному фотоприемнику, показано текущее время регистрации)

По хронологическим данным об обнаружении вещества можно оценить угловую скорость движения облака и расстояние до него. Движение облака по угловому полю ИК-канала панорамного ИК ФСР происходило со скоростью приблизительно 1 пиксель за 2 с, т.е. на один пиксель приходилось угловое поле по горизонтали $\Delta\varphi = 14^\circ/16 = 0,875^\circ = 0,0153$ рад. Таким образом, угловая скорость движения облака относительно панорамного ИК ФСР составляла $\omega = 7,65 \cdot 10^{-3}$ рад/с.

Знание угловой скорости движения облака относительно ИК ФСР позволяет грубо оценить расстояние от прибора до облака при условии, что вектор скорости ветра перпендикулярен вектору трассы наблюдения ($L \approx V/\omega$). Подставив в приведенное соотношение характерное значение скорости ветра 2...4 м/с, найдем значение дальности $L \approx 260 \dots 520$ м.

Расчет данных, полученных от двух ИК ФСР, показал, что расстояние от приборов до облака составляло приблизительно 450 м. Таким образом, значение линейной скорости составило $V = 3,5$ м/с, что соответствовало градации “слабый ветер” (сила ветра 3 балла по шкале Бофорта). Полученные данные по порядку согласуются с данными архива метеонаблюдений для исследованной местности, во время проведения экспериментов зафиксирована скорость ветра около 2 м/с.

Данные о скорости и направлении движения облака могут быть использованы для сопровождения облака паров вещества как в ручном, так и в автоматическом режиме, а также для прогнозирования

распространения вещества на местности. Кроме того, в процессе обнаружения облака паров вещества и расчете его движения в воздушной среде зафиксировано увеличение его угловых размеров, что является следствием диффузии вещества в среде, а также движения различных слоев воздушных масс (см. рис. 7). Полученные данные могут быть применены для решения задач исследования кинетических процессов, происходящих в атмосфере.

Заключение. В настоящей работе описана конструкция панорамного ИК ФСР, отличительной особенностью которого является использование многоплощадочного фотоприемного устройства. Панорамный ИК ФСР позволяет в поле зрения $14^\circ \times 6^\circ$ проводить одновременное сканирование пространства по 32 каналам. Информация об обнаружении облака паров веществ дает возможность оценить динамику движения облака по апертуре ИК-канала, а также получить информацию об угловой скорости движения облака. Такие данные целесообразно использовать для сопровождения облака паров вещества в ручном режиме и для разработки алгоритмов автоматического сопровождения облака. С помощью этих данных можно исследовать процесс диффузионного рассеивания облака паров вещества в воздушной среде.

Наиболее полные данные удастся получить при одновременном сканировании воздушного пространства с помощью двух и более панорамных ИК ФСР. В этом случае становится возможным определить размеры облака паров исследуемого вещества и расстояние от приборов до облака. При последовательной обработке индикационных данных от двух приборов можно отследить динамику поведения облака на топографической карте местности и дать прогноз по распространению облака паров вещества в режиме реального времени, что особенно актуально для задач ликвидации техногенных аварий и любых других подобных случаев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрометри. М.: Наука, 2014. 456 с.
2. Зайцев К.И., Гавдуш А.А., Карасик В.Е., Юрченко С.О. Высокоточное восстановление спектральных оптических характеристик среды с помощью терагерцовой импульсной спектроскопии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2014. № 3. С. 69–92.
3. Методика получения и обработки спектральной информации с помощью статического фурье-спектрометра / К.В. Глаголев, Иг.С. Голяк, Ил.С. Голяк, А.А. Есаков, В.Н. Корниенко, А.Н. Морозов, С.Е. Табалин, И.В. Кочиков, С.И. Светличный // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. № 3. С. 486–492.
4. Вагин В.А., Гершуи М.А., Жижин Г.Н., Тарасов К.И. Светосильные спектральные приборы / Под ред. К.И. Тарасова. М.: Наука, 1988. 264 с.

5. *Обработка* двусторонних интерферограмм с учетом собственного фонового излучения фурье-спектрометра / С.К. Дворук, В.Н. Корниенко, И.В. Кочиков, М.В. Лельков, А.Н. Морозов, В.А. Поздняков, С.И. Светличный, С.Е. Табалин // *Оптика и спектроскопия*. 2002. Т. 93. № 5. С. 884–889.
6. *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.
7. *Портативный* фурье-спектрометр с неохлаждаемым фотоприемником / С.К. Дворук, В.Н. Корниенко, И.В. Кочиков, М.В. Лельков, А.Н. Морозов, М.Л. Поздышев, С.И. Светличный, С.Е. Табалин // *Оптический журнал*. 2006. Т. 73. № 11. С. 67–72.
8. *Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Фуфурин И.Л.* Распознавание веществ в открытой атмосфере по единичной интерферограмме фурье-спектрометра // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 106. № 5. С. 743–749.
9. *Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry* / A. Beil, R. Daum, G. Matz et al. // *Proceedings of SPIE*. 1998. Vol. 3493. P. 32–43.
10. *Фурье-спектрометр* ФСР-03 / А.А. Балашов, В.А. Вагин, А.И. Хорохин, В.В. Крадецкий, А.Н. Морозов, И.Л. Фуфурин, М.А. Шилов // *Приборы и техника эксперимента*. 2013. № 3. С. 142.
11. *Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е., Фуфурин И.Л.* Физические основы расчета интерферометра с вращающейся пластинкой // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80. № 8. С. 37–41.
12. *Статистическая* оценка вероятности правильного обнаружения веществ в ИК фурье-спектрометрии / А.Н. Морозов, И.В. Кочиков, А.В. Новгородская, А.А. Сологуб, И.Л. Фуфурин // *Компьютерная оптика*. 2015. Т. 39. № 4. С. 614–621.
13. *Harig R., Rusch P., Peters H.* et al. Field-Portable Imaging Remote Sensing System for Automatic Identification and Imaging of Hazardous Gases // *SPIE 7475*, 2009.
14. *Панорамный* фурье-спектрометр ПХРД-4 / Иг.С. Голяк, И.С. Голяк, А.О. Карфидов, П.А. Королёв, А.Н. Морозов, А.И. Миронов, М.А. Строков, С.Е. Табалин, И.Л. Фуфурин // *Приборы и техника эксперимента*. 2014. № 6. С. 119–120.
15. *Морозов А.Н., Светличный С.И., Фуфурин И.Л.* Коррекция волновых чисел в панорамном фурье-спектрометре // *ДАН*. 2015. Т. 464. № 2. С. 156–159.
16. *Спектрометрический* способ дистанционного определения местоположения облаков токсичных газообразных веществ в атмосфере: пат. RU 2478995 С1. № 2011144490/28 / А.Ю. Бойко, Р.Н. Садовников, П.Е. Шлыгин, А.А. Позвонков, А.С. Самородов, Д.В. Тюрин, А.Н. Морозов, С.Е. Табалин, И.Л. Фуфурин; заявл. 02.11.2011; опублик. 10.04.2013. Бюл. № 10.

REFERENCES

- [1] Morozov A.N., Svetlichniy S.I. *Osnovy fur'e-spektroradiometrii* [Basics of Fourier Spectroradiometry]. Moscow, Nauka Publ., 2014. 456 p.
- [2] Zaytsev K.I., Gavidush A.A., Karasik V.E., Yurchenko S.O. High-precision recovery of spectral substance optical characteristics by means of pulsed terahertz spectroscopy. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2014, no. 3, pp. 69–92 (in Russ.).
- [3] Glagolev K.V., Golyak Ig.S., Golyak Il.S., Esakov A.A., Kornienko V.N., Morozov A.N., Tabalin S.E., Kochikov I.V., Svetlichnyi S.I. Technique for obtaining and processing spectral information with static Fourier spectrometer. *Optics and Spectroscopy*, 2011, vol. 110, no. 3, pp. 449–455.

- [4] Vagin V.A., Gershun M.A., Zhizhin G.N., Tarasov K.I., ed. by Tarasov K.I. Svetosil'nye spektral'nye pribory [High-aperture spectral devices]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 264 p.
- [5] Dvoruk S.K., Kornienko V.N., Lelkov M.V., Pozdniakov V.A., Svetlichnyi S.I., Solovov A.V., Tabalin S.E. Processing of the bilateral interferograms from the Fourier transform Spectroradiometer considering its own background radiation. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2002, vol. 93, no. 5, pp. 884–889 (in Russ.).
- [6] Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E. Substances remote sensing using FTIR spectroradiometer. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [The Successes of Modern Radioelectronics], 2007, no. 8, pp. 34–47 (in Russ.).
- [7] Dvoruk S.K., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Lelkov M.V., Morozov A.N., Posdyshev M.L., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E. Portable Fourier spectroradiometer with an uncooled photodetector. *Journal of Optical Technology*, 2006, vol. 73, no. 11, pp. 797–801.
- [8] Kochikov I.V., Morozov A.N., Fufurin I.L., Svetlichnyi S.I. Substance recognition in the open atmosphere from a single Fourier transform spectroradiometer interferogram. *Optics and Spectroscopy*, 2009, vol. 106, no. 5, pp. 666–671.
- [9] Beil A., Daum R., Matz G. et al. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry. *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3493, pp. 32–43.
- [10] Balashov A.A., Vagin V.A., Horohorin A.I., Kradecky V.V., Morozov A.N., Fufurin I.L., Shilov M.A. FTIR Spectrometer FSR-03. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2013, no. 3, pp. 142 (in Russ.).
- [11] Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E., Fufurin I.L. Physical fundamentals of interferometer with rotating plate calculation. *Opticheskiy zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2013, vol. 80, no. 8, pp. 37–41 (in Russ.).
- [12] Morozov A.N., Kochikov I.V., Novgorodskaya A.V., Sologub A.A., Fufurin I.L. Statistical estimation of the probability of the correct substance detection in FTIR spectroscopy. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2015, vol. 39, no. 4, pp. 614–621.
- [13] Harig R., Rusch P., Peters H. et al. Field-Portable Imaging Remote Sensing System for Automatic Identification and Imaging of Hazardous Gases. *SPIE 7475*, 2009.
- [14] Golyak Ig.S., Golyak Il.S., Karfidov A.O., Korolev P.A., Morozov A.N., Stokov M.A., Tabalin S.E., Fufurin I.L. Imaging FTIR Spectrometer PHRDD-4. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2014, no. 6, pp. 119–120 (in Russ.).
- [15] Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Fufurin I.L. Correction of Wavenumbers in a FTIR Imaging Spectrometer. *Doklady Physics*, 2015, vol. 60, no. 9, pp. 388–391.
- [16] Boyko A.Yu., Sadovnikov R.N., Shlygin P.E., Pozvonkov A.A., Samorodov A.S., Turin D.V., Morozov A.N., Tabalin S.E., Fufurin I.L. The patent for the invention RU 2478995 C1. Spectrometric method for remote location of clouds of toxic gaseous substances in the atmosphere. Application no. 2011144490/28, priority 02/11/2011, registered 10/04/2013. Bul. no. 10 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.11.2015

Башкин Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).
 Bashkin S.V. — Assist. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Бойко Андрей Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника 33 Центрального научно-исследовательского испытательного института МО РФ (Российская Федерация, Вольск-18).

Boiko A.Yu. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Deputy Head of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Volsk-18, Russian Federation).

Корниенко Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Kornienko V.N. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Кочиков Игорь Викторович — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Центра прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Kochikov I.V. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Research Scientist of the Centre of Applied Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Лельков Максим Викторович — ассистент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Lelkov M.V. — Assistant of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Мионов Артем Иванович — аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Mironov A.I. — post-graduate student of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Морозов Андрей Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Morozov A.N. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Позвонков Андрей Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник 33 Центрального научно-исследовательского испытательного института МО РФ (Российская Федерация, Вольск-18).

Pozvonkov A.A. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Volsk-18, Russian Federation).

Самородов Александр Сергеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник 33 Центрального научно-исследовательского испытательного института МО РФ (Российская Федерация, Вольск-18).

Samorodov A.S. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Volsk-18, Russian Federation).

Светличный Сергей Иванович — канд. физ.-мат. наук, директор Филиала Института энергетических проблем химической физики (ФИИЭПХФ) РАН им. В.Л. Тальрозе (Российская Федерация, 142432, Московская обл., Черноголовка, пр-т акад. Семенова, д. 1, корп. 10).

Svetlichnyi S.I. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director of the Branch of Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (Acad. Semenov prospekt 1, korpus 10, Chernogolovka, Moscow Region, 142432 Russian Federation).

Табалин Сергей Егорович — научный сотрудник НИЧ НУК “Фундаментальные науки” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Tabalin S.E. — Research Scientist of the Scientific Educational Complex of Fundamental Sciences, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Фуфурин Игорь Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Fufurin I.L. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Шлыгин Петр Евгеньевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник 33 Центрального научно-исследовательского испытательного института МО РФ (Российская Федерация, Вольск-18).

Shlygin P.E. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Volsk-18, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Башкин С.В., Бойко А.Ю., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Лельков М.В., Миронов А.И., Морозов А.Н., Позвонков А.А., Самородов А.С., Светличный С.И., Табалин С.Е., Фуфурин И.Л., Шлыгин П.Е. Результаты экспериментальных исследований панорамного инфракрасного фурье-спектрометра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 51–64.
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-51-64

Please cite this article in English as:

Bashkin S.V., Boyko A.Yu., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Lelkov M.V., Mironov A.I., Morozov A.N., Pozvonkov A.A., Samorodov A.S., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E., Fufurin I.L., Shlygin P.E. Experimental results of investigating panoramic Fourier transform infrared spectrometer. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 51–64. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-51-64