

ИНДЕКС УДК 520.35:544.45

## ДЕМОНСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Калинин А.П.<sup>1</sup>, Орлов А.Г.<sup>2</sup>, Родионов А.И.<sup>2</sup> Трошин К.Я.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, г. Москва*

<sup>2</sup>*Научно-технический центр «Реагент», г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН, г. Москва*

[kalinin@ipmnet.ru](mailto:kalinin@ipmnet.ru)

### Аннотация

На основе созданного лабораторного гиперспектрометра, предназначенного для дистанционного зондирования отраженного, рассеянного и излученного света с расстояния 3 м., продемонстрирована возможность дистанционного зондирования процессов горения и взрыва. Особенно интересна возможность изучения процессов с излучением света, происходящих при горении и взрыве одновременно в широком диапазоне длин волн. Кроме того, гиперспектрометр обеспечивает измерение временной зависимости спектров свечения, происходящего при горении и взрыве.

### DEMONSTRATION OF THE POSSIBILITIES TO STUDY COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES ON THE BASE OF HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING

The laboratory hyperspectrometr for remote sensing reflected, scattered and emitted light from the distance of 3 m was developed. The possibility of the remote sensing combustion and explosion processes was demonstrated. The special interest is the opportunity to study the processes of combustion and explosion with light emission simultaneously in the wide range of wavelength. Also hyperspectrometer allow the measurement time dependent response of spectral emission frequency.

### Введение

В настоящее время все большее распространение приобретают дистанционные методы изучения различных процессов. Существуют различные приборы, которые предназначены для дистанционного исследования. В частности, гиперспектрометр является прибором, который позволяет осуществлять дистанционную регистрацию отраженного, рассеянного и излученного света [1,2,3]. По сложившейся в настоящее время терминологии гиперспектральными называют измерения в диапазоне от нескольких сотен до тысячи спектральных каналов, а гиперспектрометром – прибор, осуществляющий одновременно измерение спектральной и пространственных координат. Идентификация объектов и материалов при гиперспектральных измерениях базируется на способностях этих зондируемых объектов излучать, поглощать и отражать световые волны. Фундаментальной основой используемого метода дистанционного зондирования является однозначное

соответствие между регистрируемым оптическим сигналом и элементарным составом отражающей или излучающей поверхности (объема). Наиболее распространенными на сегодняшний день являются гиперспектрометры, которые в один момент времени регистрируют узкий отрезок поверхности, которая излучает, отражает или рассеивает свет. Регистрация производится на двумерную матрицу, по одной координате которой отсчитывается пространственная координата, а по другой спектральная. Основным понятием гиперспектральной съемки является «гиперкуб». Так в мировой литературе называют множество данных, образованных значениями интенсивности отраженного от исследуемой двумерной поверхности местности (предмета), разбитой условно на элементы изображения - пиксели или излученного светового сигнала. Кроме двух стандартных координат  $X$  и  $Y$  добавляется спектральная координата, что обеспечивает трехмерность пространства данных (рис.1). Кроме того, может добавляться еще поляризационная координата. Таким образом, измеряемые гиперспектрометром данные представляют собой значения функции, заданной в многомерном пространстве. Это и обусловило название – гиперкуб.

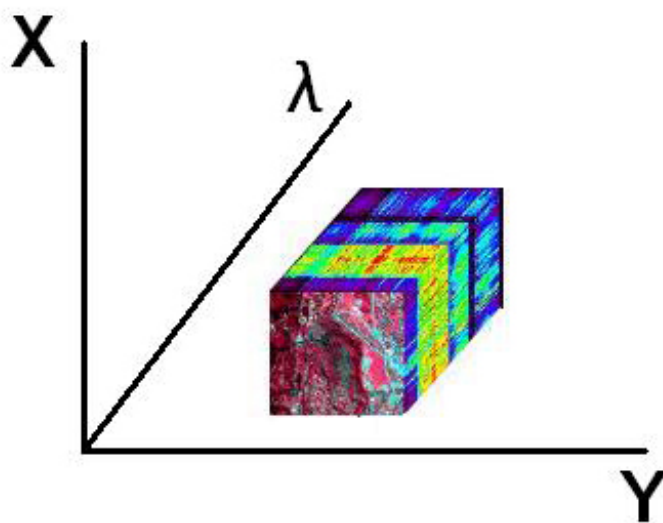


Рис.1. Гиперспектральный куб

Формирование изображения узкого отрезка поверхности производится посредством узкой щели. Наиболее часто гиперспектрометры используются для дистанционного зондирования Земли и других планет с борта авиационных и космических носителей с целью получения гиперспектральных изображений, предназначенных для идентификации объектов и материалов, составляющих их поверхность [2]. Представляет интерес использовать гиперспектрометр в качестве лабораторного прибора для биохимического исследования растительности [4], а также для изучения процессов, при которых излучается свет. Целью

настоящей работы является описание созданного лабораторного гиперспектрометра с конечным расстоянием до изучаемого объекта и демонстрации его возможности для дистанционного изучения физико-химических процессов горения и взрыва. Большой интерес представляет возможность исследования не только пространственной картины распределения свечения, но и регистрация зависимости спектрального состава излученного света от времени.

### Описание гиперспектрометра.

Оптическая схема гиперспектрометра показана на рис.2. Она состоит из входного объектива (1), щелевой диафрагмы (2), коллимирующего объектива (3), спектроделителя (4), проекционного объектива (5). Щелевая диафрагма шириной 30 мкм формирует поле зрения на исследуемом объекте с расстояния 3 м размерами  $\Delta X = 420$  мм и  $\Delta Y = 1,3$  мм (рис.3).

На спектроделителе (4) (в данном случае призме) происходит разложение изображения в спектр, которое затем проецируется объективом (5) на фотоприемную матрицу (6).

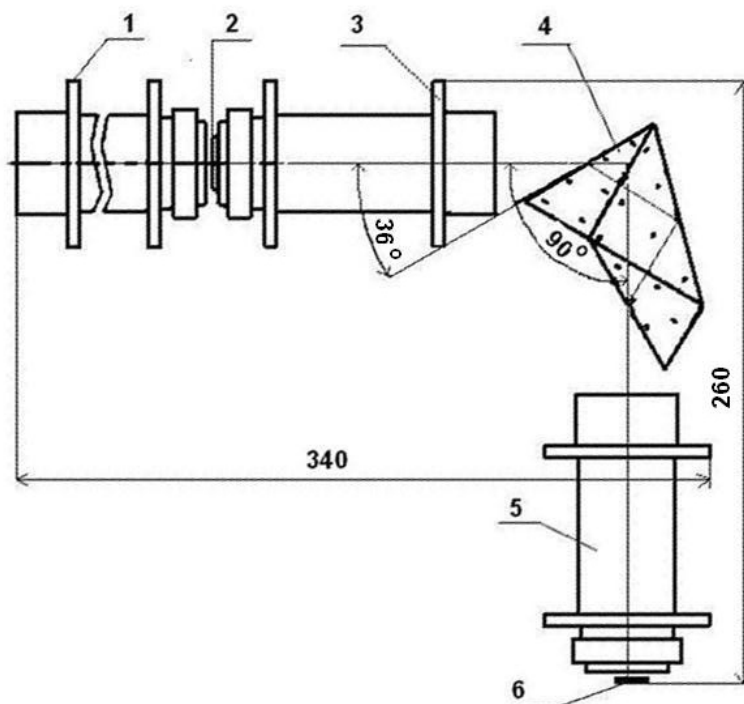


Рис.2. Оптическая схема лабораторного гиперспектрометра: 1 – входной объектив, 2 – формирующая щель, 3 – коллимирующий объектив, 4 – призма, 5 – проекционный объектив, 6 – фотоприемная матрица. Габаритные размеры в мм.

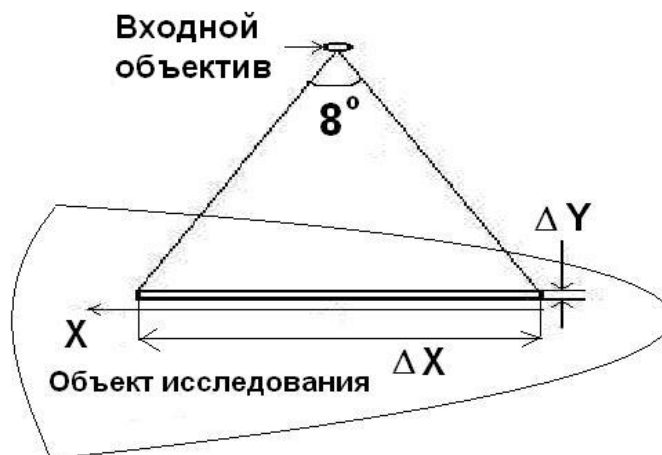


Рис.3. Полоса исследуемого объекта, проецируемая на вход спектроделителя.

Оптическая система гиперспектрометра формирует на фотоприемной матрице изображение, по одной оси которого отложена координата  $X$  узкой полосы исследуемого объекта, по другой длина волны  $\lambda$  излучения, а величина заряда, накапливаемого внутри каждого элемента матрицы (пиксела) прямо пропорциональна спектральной плотности излучения на данной длине волны. Трехмерная картина зависимости спектральной плотности на фотоприемной матрице флуоресценции образца Ge, покрытого родамином В [5], от координат  $X$  и  $\lambda$  показана на рис.4.

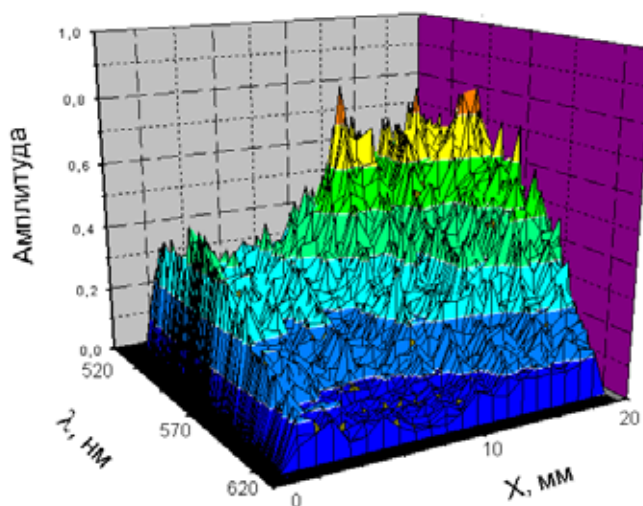


Рис.4. Гиперспектр флуоресценции образца Ge, покрытого родамином В (амплитуда характеризует спектральную плотность излучения для каждой пары  $(X, \lambda)$ ).

Таким образом, на фотоприемной матрице получается набор спектральных зависимостей излучения для выбранной координаты  $X$  (от участка  $\Delta X \times \Delta Y$  полосы вырезаемого изображения на объекте наблюдения). Спектральная зависимость для координаты  $X=10$  мм показана на рис.5.

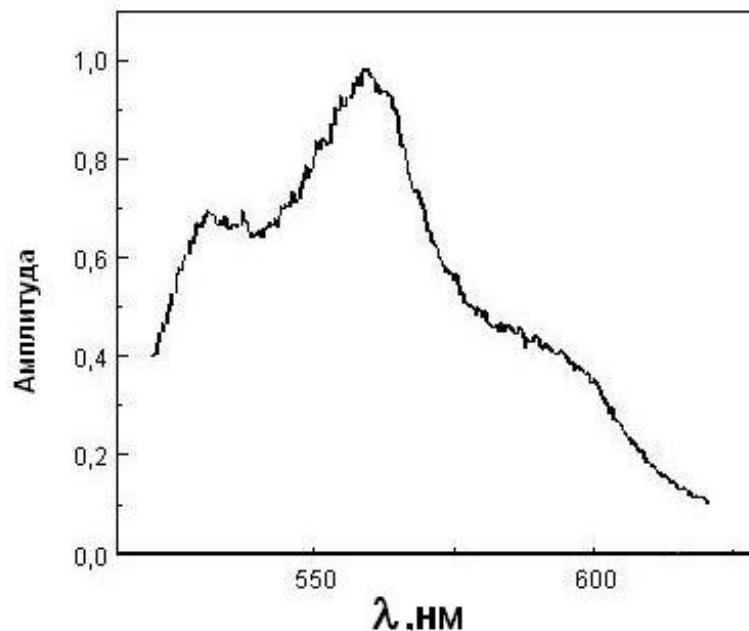


Рис.5. Спектр, полученный гиперспектрометром для значения координаты  $X=10$  мм.

В качестве фотоприемного устройства используется активно пиксельная матрица. Для управления матрицей, организации съема и сохранения цифровых видеоданных применена программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) Virtex2Pro со встроенным процессором PowerPC. Внешний вид гиперспектрометра показан на рис.6. Съём данных с фотоприемной матрицы осуществляется с частотой 100 Гц. Полученные значения спектральной плотности хранятся на жестком диске, расположенном под блоком питания (рис.6).

Для обработки полученной информации было создано программное обеспечение, которое позволяло производить устранение дисторсий изображения, связанных с неидеальностью оптической системы. Была произведена калибровка гиперспектрометра, аналогичная проведенной в работах [6,7]. Созданный лабораторный прибор был использован для демонстрации возможностей дистанционного исследования биохимического состава растительности [4] и для дистанционного изучения процессов горения и взрыва.

Основные технические характеристики лабораторного гиперспектрометра приведены в таблице.

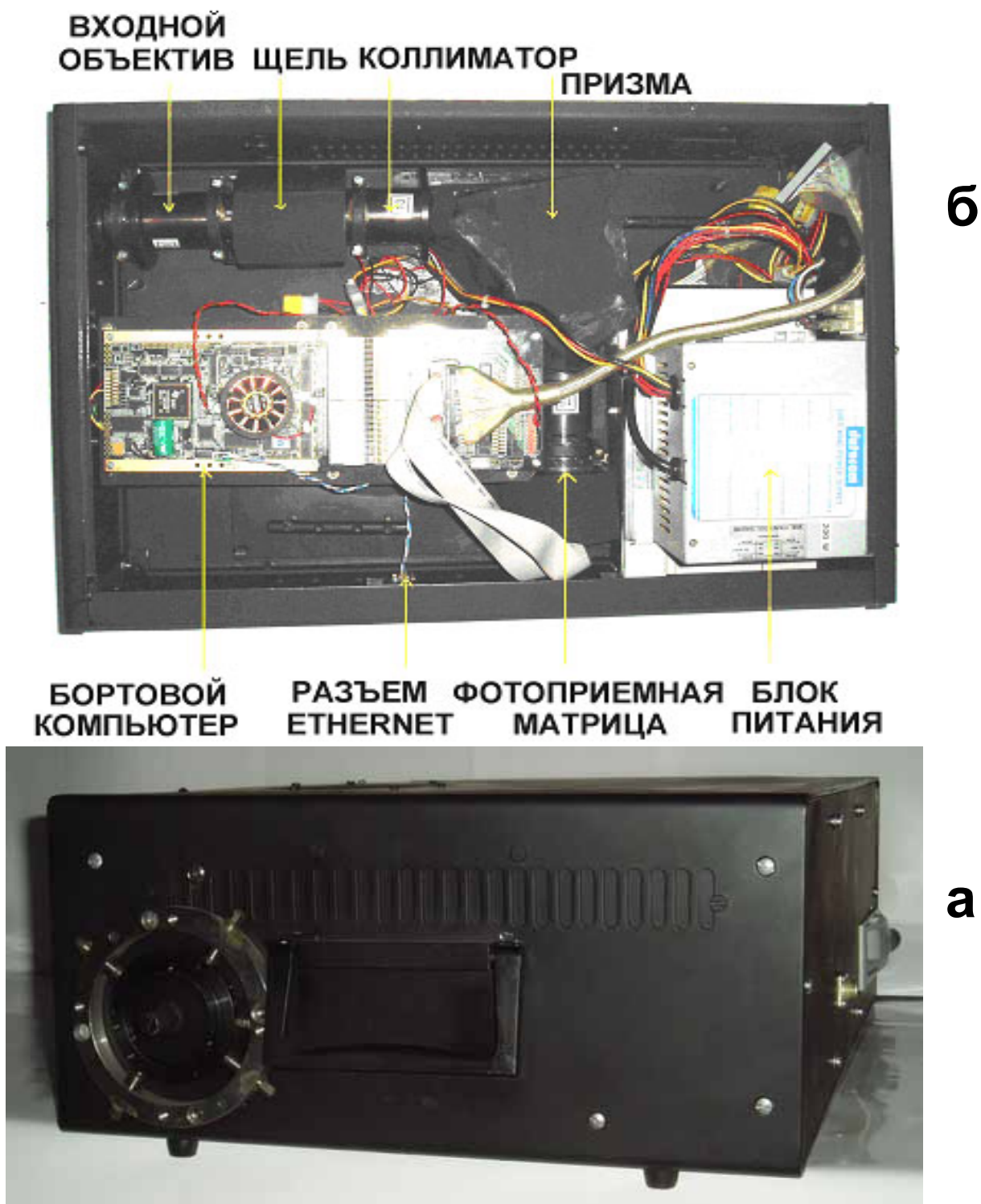


Рис.6. Вид лабораторного гиперспектрометра (а) и со снятой верхней крышкой (б).

Таблица

**Основные технические характеристики гиперспектрометра**

Характеристика	Значение параметра
<i>Угол зрения в вертикальном направлении, град</i>	8
<i>Число линий в вертикальном направлении не менее</i>	250
<i>Спектральный диапазон, нм</i>	500-900
<i>Спектральное разрешение, нм</i>	1,5-10,0

Подробное описание принципов расчета призмного гиперспектрометра можно найти в работах [7,8].

**Описание экспериментальной установки**

На рис.7 показана фотография экспериментальной установки, на которой производились гиперспектральная съемка процессов горения и взрыва.



Рис.6. Фотография экспериментальной установки.

Основным преимуществом установки является разборная конструкция, что обеспечивало возможность вскрывать установку после каждого опыта и извлекать из неё образовавшуюся сажу, и, таким образом, достоверно определять выход конденсированного продукта. Схема установки приведена на рис.8. Здесь 1 – бомба, 2 - электронагреватель, 3 –



термопара, 4 - напуск смеси газов, 5 – натекатель газа, 6 – датчик давления, 7 –устройство пережигания проволоки, 8 – смотровое кварцевое окно, 9 – откачка бомбы.

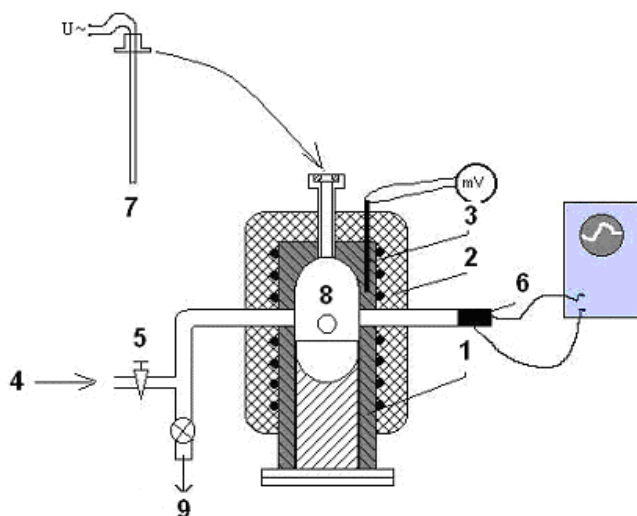


Рис.8. Схема экспериментальной установки для изучения горения и взрыва.

При исследовании ламинарных режимов горения для зажигания смеси использовали электрический способ пережигания тонкой проволоочки. Исследования проводили на кислородных смесях метана с коэффициентами избытка кислорода  $\alpha=0.25, 0.30$  и  $0.35$  в диапазонах начальных давлений от 15 до 40 атм. и температур от  $22^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Продуктами горения были:  $\text{H}_2$  - более 50%,  $\text{CO}$ , сажа.

Запуск съема цифровых видеоданных был синхронизован с поджигом смеси в экспериментальной установке. Регистрация излучения производилась через смотровое кварцевое окно (8).

### Результаты измерений процессов горения и взрыва.

На рис.9 поясняется процесс гиперспектральной съемки процесса горения и взрыва и получаемые экспериментальные результаты. Гиперспектрометр устанавливался на расстоянии 3 м от кварцевого окна экспериментальной установки. Поле зрения спектрометра обеспечивало обзор узкой полоски вдоль окна (рис.9а). На рис.9с показана часть изображения, получаемого на экране компьютера с матрицы в момент времени  $t=2,38$  мкс. Узкая светящаяся полоса соответствует развертке спектра по длине волны вдоль горизонтального направления. Ширина этой полосы связана с диаметром смотрового окна.



Так как диаметр окна равен 8 мм, а гиперспектрометр вырезает изображение длиной 420 мм (весь экран компьютера по вертикали), то светящаяся полоса получается узкой.

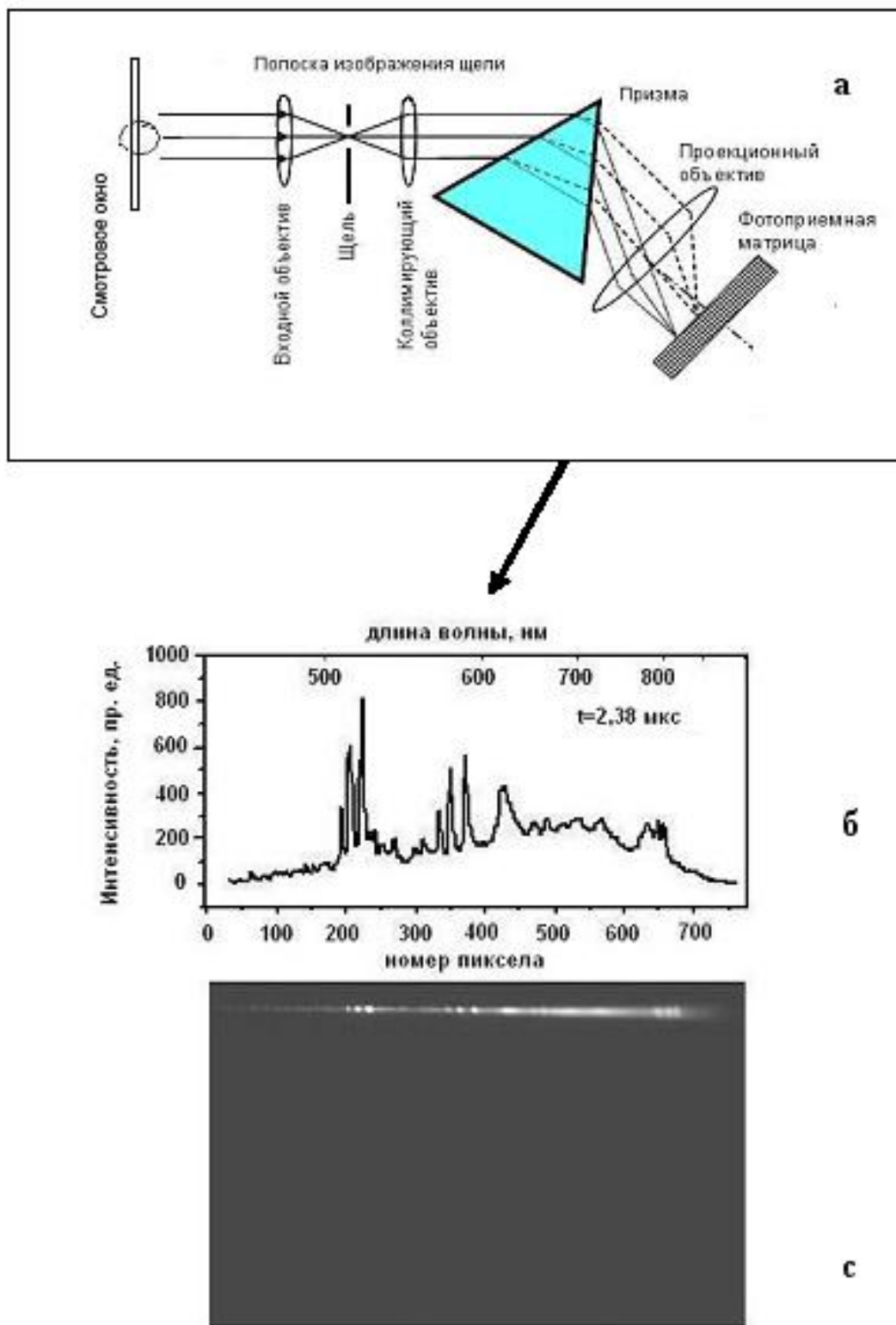


Рис.9. Рисунок, поясняющий, процесс гиперспектральных измерений в момент времени  $t = 2,38 \text{ мкс}$ .

Интенсивность свечения в отдельных точках светящейся полосы соответствует спектральной плотности излучения для данной длины волны. На рис.9б демонстрируется расшифровка этого изображения (зависимости интенсивности свечения от номера пиксела матрицы (длины волны). Переход от номера пиксела матрицы к длине волны стал возможен благодаря проведению калибровочных измерений, аналогичных выполненным в работе [6]. Хорошо видно соответствие интенсивности свечения на полосе с высотой пика на графике. Если бы ширина окна на экспериментальной установке было бы больше (максимум 420 нм), то тогда бы на рис.9с была бы уже широкая светящаяся полоса, заполняющая весь экран по вертикали и были бы также получены спектральные зависимости интенсивности излучения от положения точки горения по камере горения (причем все зависимости получаются для данного момента времени).

На рис.10a,b,c представлены зарегистрированные зависимости интенсивности излучения взрыва в зависимости от времени от начала поджига.

На рис.11 показана зависимость интегралов спектров излучения рис.10 (интенсивность свечения) от времени начала поджига.

В задачу данной работы не входил анализ полученных материалов с точки зрения физики и химии процессов горения и взрыва. Отметим только что кривые, изображенные на рис.10a свидетельствуют о начале реакции и об образовании радикалов. Кривые, изображенные на рис.10b свидетельствуют о переходе реакции в фазу равновесного состояния. При этом, судя по спектрам, в основном регистрируются водород и CO.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о больших возможностях использования гиперспектрометра для дистанционного изучения процессов горения и взрыва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям.

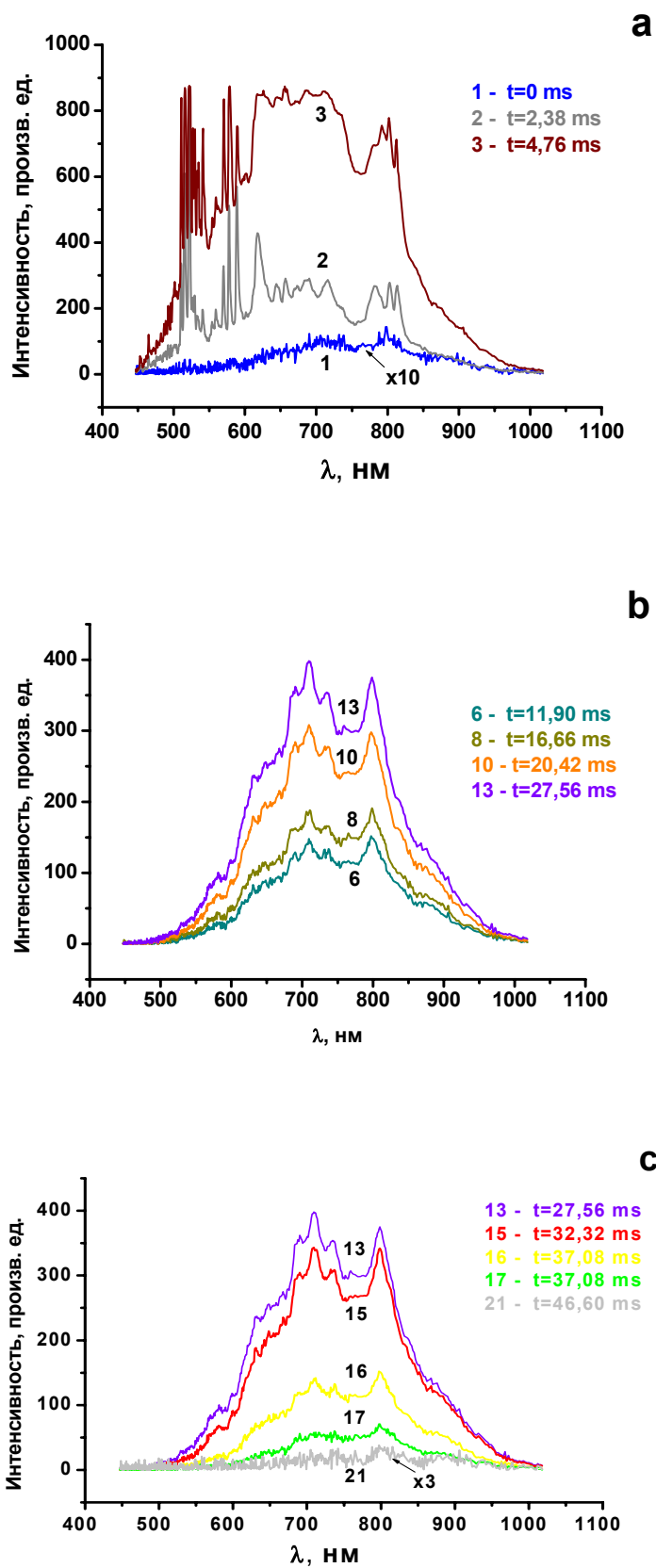


Рис.10. Спектры излучения взрыва в зависимости от времени.

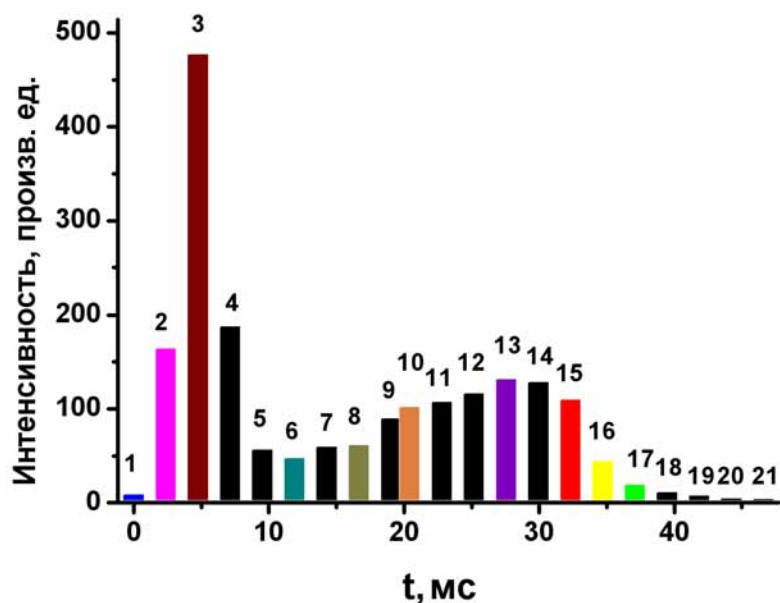


Рис.11. Зависимость интенсивности свечения взрыва от времени (цифры соответствуют номерам кривых рис.10).

## Литература

1. Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф. Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли, Препринт ИПМех РАН №702, 35 с, 2002.
2. Непобедимый С.П., Родионов И.Д., Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калашников С.К., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Родионов А.И., Шилов И.Б., Любимов В.Н., Осипов А.Ф. Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли // Докл. Акад. Наук, 2004, Том 397, №1, С. 45-48.
3. Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Родионова И.П., Орлов А.Г. Гиперспектрометр – как элемент системы интеллектуального технического зрения // Датчики и системы, 2007, №8, С.33-35.
4. Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.И., Родионов И. Д. Возможности использования гиперспектрометра для биохимического исследования растительности Препринт ИПМех РАН № 885, 25 с., 2008.
5. Родионов А.И., Зубков Б.В., Калинин А.П., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Родионов И.Д., Родионова И.П., Шилов И.Б. Развитие методов многомерных измерений при оптических исследованиях поверхности //Журнал технической физики, 2002, том 72, №10, С.67 – 72,.
6. Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Дубровицкий Д.Ю., Зубков Б.В., Яковлев Б.А. Оценка спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометра АГСМТ-1 Препринт ИПМех РАН № 704, 38 с., 2002.
7. Орлов А.Г. Гиперспектральный датчик оптического и ближнего ИК диапазонов // Датчики и системы, 2008, №5, С. 2-5.
8. Орлов А.Г. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов // Дисс. канд-та. тех. наук., ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН 2008, 160 с.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2009 г.