

# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона



Виноградов А.Н., Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П.

*АО Научно-технический центр "Реагент", г. Москва*



Егоров В.В.

*Институт космических исследований РАН, г. Москва*



Калинин А.П.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва*



# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

## Введение

Узкоугольный гиперспектрометр (УГС) [1] предназначен для формирования изображений видимого и ближнего инфракрасного диапазона (425 - 1000 нм), получаемой посредством сканирования узкой поперечной полосой обзора в режиме авиационной съемки по схеме push broom, а также в наземных условиях с использованием поворотного устройства. Важно подчеркнуть, что УГС является прибором, позволяющим получать информацию о спектре принимаемого сигнала, служащим его достаточной статистикой. В связи с этим вопрос о его калибровке (радиометрической, радиационной, спектральной, пространственной), осуществляемой с помощью лабораторных, натурных и стендовых испытаний, представляется весьма актуальным. Задачей калибровки является определение функции зависимости полезного сигнала от спектральной плотности энергетической яркости поля зрения и времени экспозиции для каждого пиксела формируемого прибором изображения.

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Данные дистанционной съемки, прошедшего весь комплекс предполетной и послеполетной калибровки гиперспектрального сенсора, могут использоваться в процедурах предварительной и тематической обработки. Вместе с тем, несмотря на реальную актуальность и важность процедур калибровки гиперспектральных сенсоров, им часто уделяется недостаточное внимание. В связи с этим представим описание самого сенсора и рассмотрим методические вопросы и результаты калибровки узкоугольного гиперспектрометра, выполненных в ходе лабораторных, полигонных и стендовых испытаний.

## Конструкция и технические характеристики УГС

Оптическая система гиперспектрометра приведена на рис. 1. Такой вариант оптической схемы был выбран для уменьшения габаритов сенсора.

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

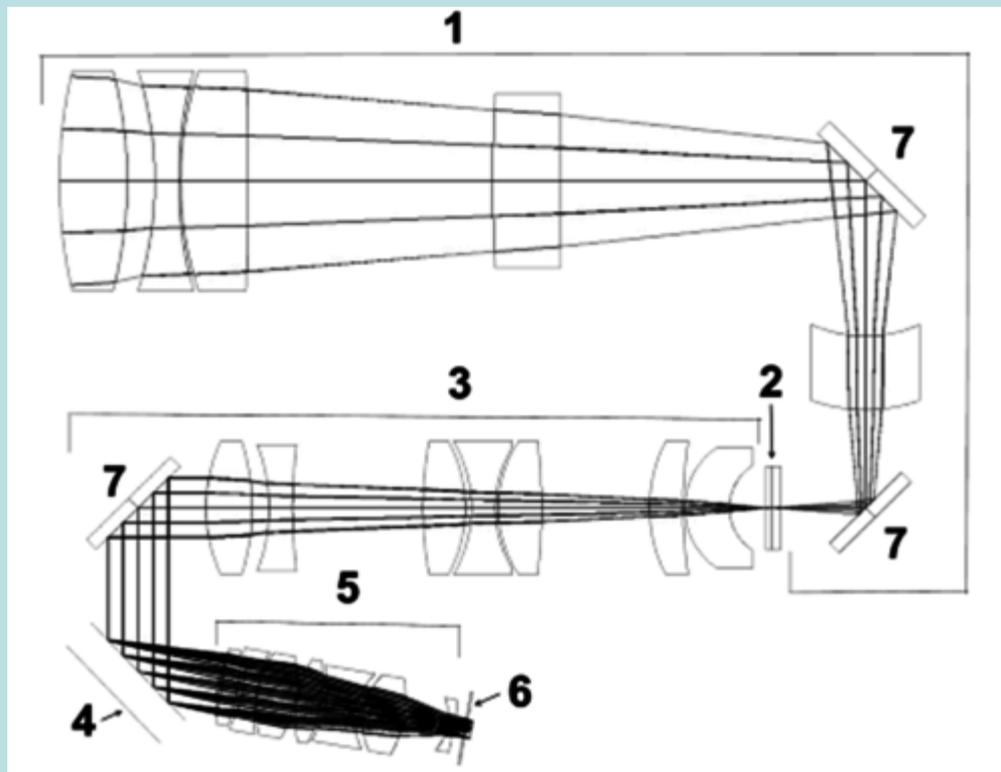


Рис. 1. Входной объектив 1, диафрагменный узел (входная щель) 2, коллиматор 3, дифракционную решетку 4, выходной объектив 5, фотоприемное устройство (фотоприемная матрица) 6 и отклоняющие зеркала 7. Такой вариант оптической схемы был выбран для уменьшения габаритов сенсора.

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

### Тактико-технические характеристики гиперспектрометра

| Наименование параметра                          | Значение |
|---|----------|
| Спектральный диапазон, нм                       | 430-900  |
| Угол поля зрения, град                          | 4,0      |
| Ширина спектральных каналов, нм                 | 1,5      |
| Число спектральных каналов                      | 310      |
| Число пикселей по пространственной координате   | 2048     |
| Геометрический размер пиксела с высоты 1000м, м | 0,05     |
| Масса, кг                                       | 4,5      |

# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

## Методика и результаты испытаний

Испытания УГС проводились в лаборатории, на испытательном стенде, где на начальном этапе испытаний выполнялась следующие процедуры:

- юстировка гиперспектрального прибора, состоящая в установлении проецирования изображения щели целиком на матрицу или, по крайней мере, с максимальным покрытием матрицы (с отступом по краям матрицы не более 1-2 пиксела);
- определение уровня темнового тока;
- определение «активной» области матрицы;
- проверка линейности по выдержке и яркости;
- проверка угла зрения прибора;
- определение спектрального диапазона и числа спектральных каналов;
- проверка угла зрения прибора;
- определение числа спектральных каналов;
- исправление спектральных дисторсий

Основной этап испытаний включал в себя:

- спектральную калибровку гиперспектрометра;
- пространственную калибровку и определение пространственной разрешающей способности гиперспектрометра;
- радиометрическую калибровку.

# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

## Начальный этап калибровки

### *Юстировка гиперспектрального прибора*

Состояла в установлении проецирования изображения щели целиком на матрицу или, по крайней мере, с максимальным покрытием матрицы (с отступом по краям матрицы не более 1-2 пиксела) и проводилась с использованием монохроматора.

### *Определение уровня темнового тока*

Заключалась в освещении щели гиперспектрометра сигналом со сплошным спектром в диапазоне 400 -1000 нм и проверке границ, в которых выходные сигналы пикселов статистически достоверно отличаются от темновых сигналов, что свидетельствует о хорошем заполнении матрицы после проведения юстировки.

### *Определение «активной» области матрицы*

Заключалась в освещении щели гиперспектрометра сигналом со сплошным спектром в диапазоне 400 - 1000 нм и проверке границ, в которых выходные сигналы пикселов статистически достоверно отличаются от темновых сигналов, что свидетельствовало о хорошем заполнении матрицы после проведения юстировки.

## **Калибровка узкоугольного гиперспектрометра**

### ***Проверка линейности по выдержке и яркости***

Осуществлялась линейности сигналов с выхода детекторных элементов матрицы (пикселов) от выдержки при нескольких значениях равномерного поля яркости источника излучения, а также линейности сигналов от уровня яркости поля зрения при различных значениях времени экспозиции и которая продемонстрировала хорошую линейность сигнала от времени экспозиции при изменении этого параметра.

### ***Определение угла зрения прибора***

Было произведено по измерению двух одновременно светящихся точек, на определенном расстоянии от гиперспектрометра, и отсюда был определен угол зрения прибора.

### ***Определение мгновенного углового поля зрения прибора***

Было выполнено по измерениям зависимости интенсивности измеренного сигнала изображения узкой щели монохроматора в зависимости от ее ширины.

# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

## *Определение спектрального диапазона и числа спектральных каналов*

Для определения спектрального диапазона источник излучения устанавливался напротив входной щели монохроматора. Выбиралась длина волны 550 нм. Исследуемый гиперспектрометр устанавливался напротив выходной щели монохроматора так, чтобы при заданном времени экспозиции (выдержки) изображение щели имело максимальную яркость. Длина волны излучения на выходе монохроматора уменьшалась до тех пор, пока изображение выходной щели не перестало регистрироваться гиперспектрометром. Фиксировалась длина волны  $\lambda_{\min}$ , при которой изображение выходной щели еще регистрировалось прибором.  $\lambda_{\min}$ . Величина ее составила 430 нм. Аналогично была найдено значение  $\lambda_{\max}$ . Оно равнялась 900 нм. Таким образом, реальное число спектральных каналов УГС при спектральном разрешении 1,5 нм равняется 310.

## **Калибровка узкоугольного гиперспектрометра**

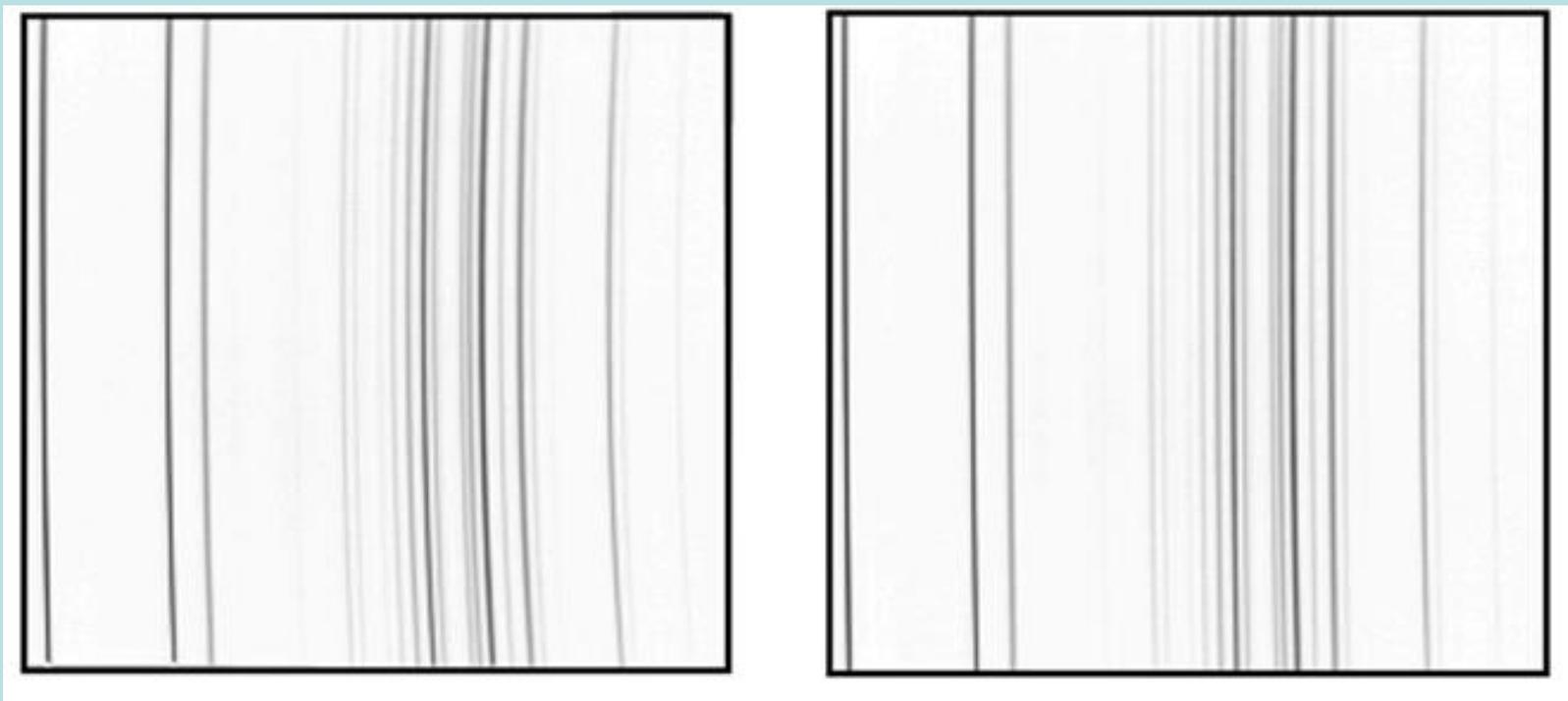
### ***Определение мгновенного углового поля зрения прибора***

Определение мгновенного углового поля зрения прибора было определено выполнено по измерениям зависимости интенсивности измеренного сигнала изображения узкой щели монохроматора в зависимости от ее ширины.

### ***Исправление спектральных дисторсий***

Влияние оптической системы на пучок лучей проявляется в том, что изображение прямолинейной входной щели на матрице на заданной длине волны оказывается искривлено и иногда смещено. Для выявления подобных спектральных дисторсий использовалось излучение эталонной ртутной лампы (6035). Пример проявления спектральных дисторсий показан на рис. 2а, а на рис. 2б - то же изображение линий ртутной лампы после выполнения процедур программной коррекции спектральных дисторсий.

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра



**Рис. 2. Исправление дисторсии (распределение спектральной интенсивности линий ртутной лампы): а – исходное распределение; б – откорректированное распределение**

**В результате коррекции дисторсий величина отклонения линий спектральной интенсивности от прямой составила несколько десятых долей пиксела.**

# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

## Основной этап калибровки Спектральная калибровка

В лабораторных условиях помимо собственно спектральной калибровки каналов гиперспектрометра, т.е. правильности локализации спектральных линий исследуемого сигнала проводились работы по оценке его спектрального разрешения и определения спектральной дисторсии. Кроме того, в ходе стендовых испытаний производилось определение спектрального диапазона УГС и количества спектральных каналов.

С помощью монохроматора была проведена калибровка гиперспектрометра по соответствию номера пиксела матрицы длине волны (черные квадраты на рис. 3).

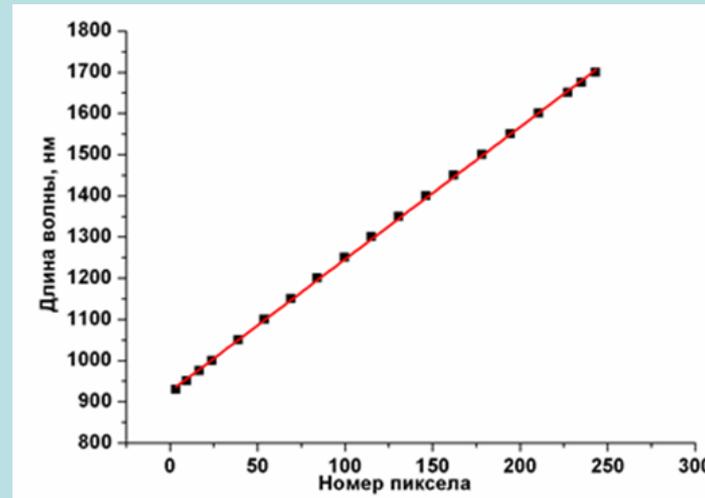


Рис. 3. График соответствия номера пиксела матрицы и длины волны светового луча

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Для определения точности локализации спектральных линий исследуемого сигнала использовалась ртутная лампа 6035 фирмы Newport.

На рис. 4 представлен измеренный гиперспектрометром спектр ртутной лампы, а в табл. 2 приведены длины волн линий спектра, полученные по измерениям гиперспектрометром, и паспортные данные ртутной лампы, а также значения разности между соответствующими длинами волн.

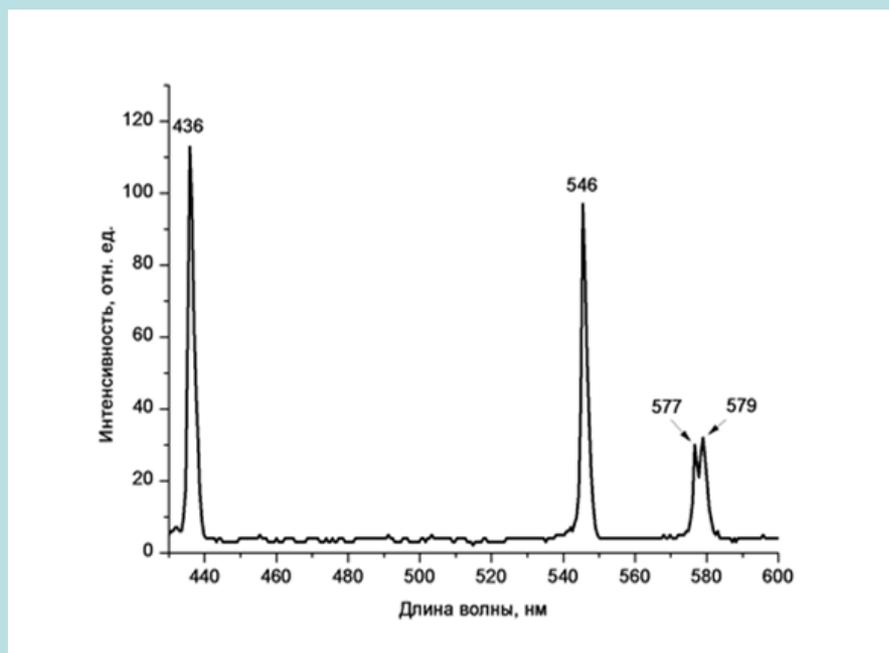


Рис. 4. Спектр ртутной лампы, измеренный гиперспектрометром

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Из анализа сдвоенной линии на рис. 4 можно заключить, что спектральное разрешение УГС по критерию Рэля составляет порядка 1,5 нм.

Значения длин волн спектра ртутной лампы, измеренного гиперспектрометром, длины волн эталонной ртутной лампы (6035) и их разность представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения длин волн спектра ртутной лампы, измеренного гиперспектрометром, длины волн эталонной ртутной лампы (6035) и их разность.

| № пп. | Длины волн, измеренные гиперспектрометром, нм | Длина волны спектральных линий ртутной лампы, нм | Разность соответствующих длин волн, нм |
|-------|---|--|--|
| 1     | 436,01  | 435,82   | 0,13                                   |
| 2     | 545,97  | 545,52   | 0,45                                   |
| 3     | 576,67  | 576,12   | 0,55                                   |
| 4     | 578,85  | 579,07   | 0,22                                   |

## **Калибровка узкоугольного гиперспектрометра**

Из табл. 2 следует, что среднеквадратичное отклонение длин волн, измеренных гиперспектрометром, и задаваемых паспортом ртутной лампы равно 0,19 нм. Таким образом, неопределенность истинного положения экспериментальных линий спектра исследуемого сигнала существенно меньше спектрального разрешения или ширины спектрального канала (1,5 нм), что свидетельствует о правильности заложенных в проектирование гиперспектрометра условий и его хорошем техническом исполнении.

### **Пространственная калибровка**

Данный этап испытаний включал в себя процедуры собственно пространственной (фотограмметрической) калибровки и оценку пространственной разрешающей способности УГС и, кроме того, демонстрацию работоспособности прибора.

Пространственная разрешающая способность определялась по реальному RGB-изображению (см. рис. 5). На врезке показан фрагмент изображения (см. красный прямоугольник), полученный гиперспектрометром, ось визирования которого при съемке была наклонена на 5 град и который использовался для вычисления частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) гиперспектрометра по методу наклонного края [6].

## Калибровка узкоугольного гиперспектретра



Рис. 5. RGB-изображение городского пейзажа, полученное узкоугольным гиперспектретром.

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Последовательность процедур вычисления ЧКХ сводилась к следующим шагам: определению 60 профилей яркости поперек контрастного края для фрагмента на рис. 4; пространственному совмещению наклонных участков профилей с целью их усреднения; вычислению производной полученного усредненного профиля; вычислению ЧКХ, посредством осуществления дискретного преобразования Фурье графика производной (Рис. 6).

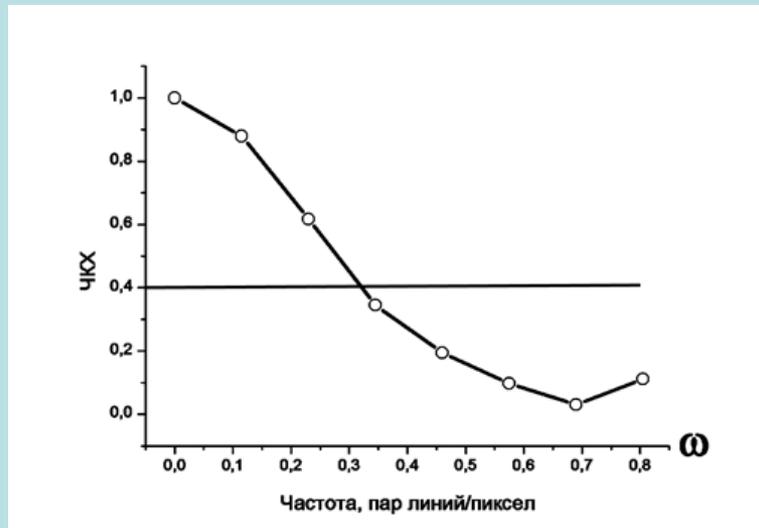


Рис. 5. График ЧКХ гиперспектрометра, полученный с использованием метода наклонного края, для фрагмента изображения, показанного на врезке (см. рис.4).

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Линейный размер объекта  $r$ , разрешаемый гиперспектрометром с заданным уровнем контраста, определяемого по ЧКХ, вычислялся по формуле (на уровне контраста  $\sim 0,4$ ).

$$r = \frac{R \cdot d}{f \cdot \omega} \quad (1)$$

Здесь  $R$  - расстояние до выделенного фрагмента изображения (рис. 4) равнялось 1 км,  $d$  - линейный размер детекторного элемента матрицы, равный 5,5 мкм,  $f$  - фокусное расстояние объектива УГС, равное 0,138,  $\omega$  - частота пар линий на пиксел, равная 0,32 для уровня ЧКХ 0,4 (см. рис. 5). Подставляя приведенные выше значения в (1), получим, что  $r = 0,124$  м.

Следует отметить, что величина реального разрешения  $r$  более чем в два раза превышает значение поля зрения пиксела, равное 0,05 м (см. Тактико-технические характеристики гиперспектрометра). Это объясняется тем, что, как показано в работе [6], средний размер пятен рассеяния точки гиперспектрометра равен 7 мкм, т.е. такое пятно проецируется на два детекторных элемента матрицы с линейным размером 5,5 мкм, что в два раза ухудшает пространственное разрешение.

# Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

## Радиометрическая калибровка

Одной из наиболее важных характеристик оптических приборов является его спектральная чувствительность как абсолютная, так и относительная.

В качестве источника эталонного распределения яркости в поле зрения УГС использовалась эталонная галогенная лампа с молочным стеклом RS-10D, спектральная плотность излучения которой показана ниже.

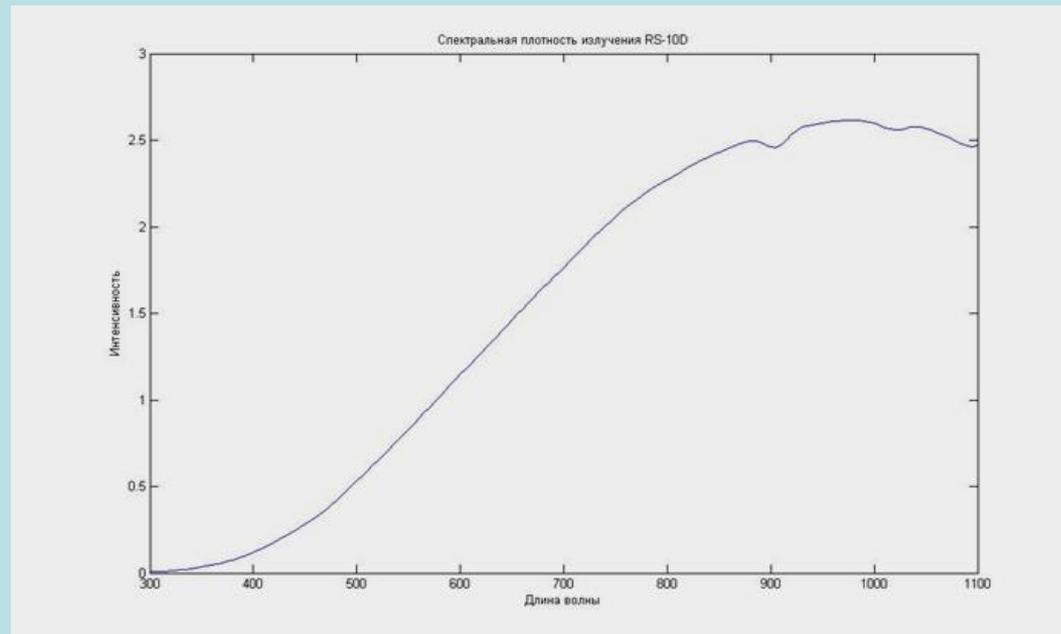


Рис. 6. Спектральная плотность излучения RS-10D

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Абсолютная спектральная чувствительность УГС измеренная в трех строках матрицы имеет вид:

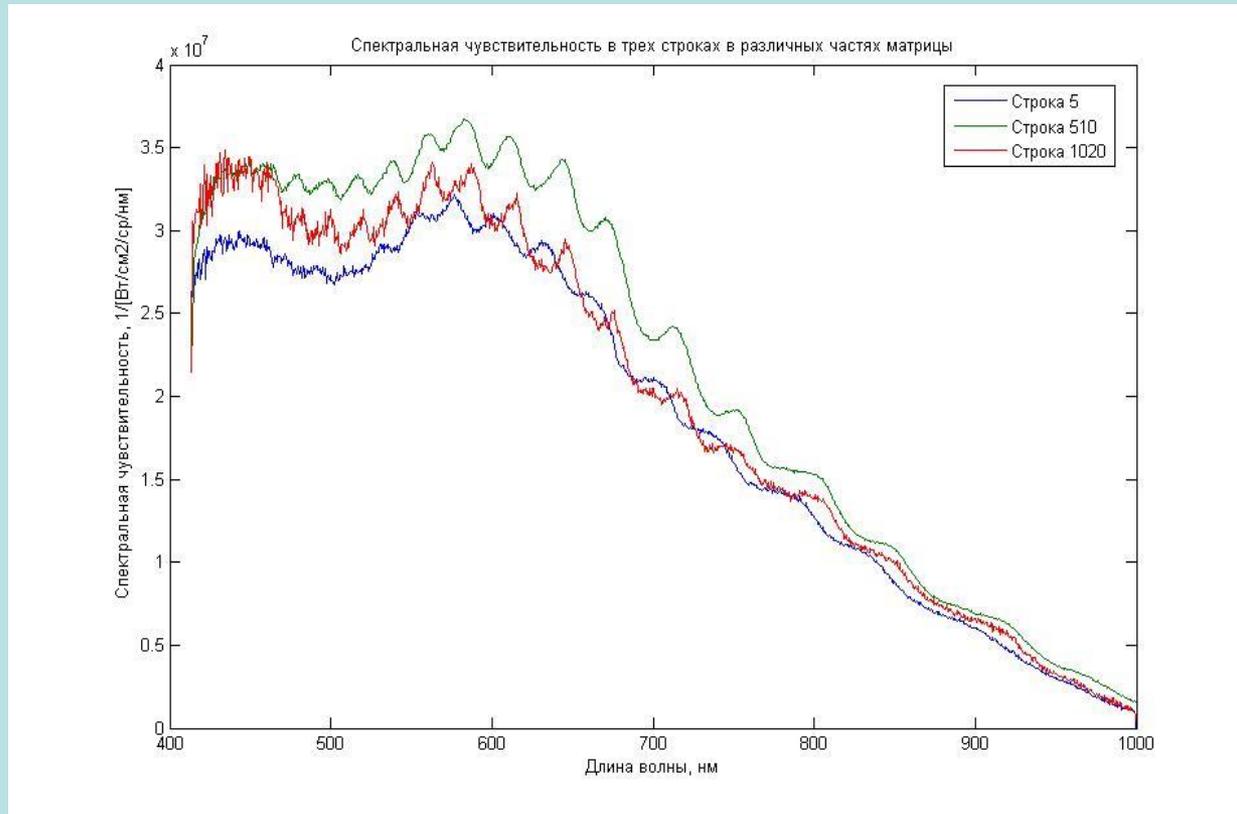


Рис. 7. Абсолютная спектральная чувствительность в строках матрицы 5, 510, 1020

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Графики относительной спектральной чувствительности получаются из предыдущих путем их нормирования на максимумы абсолютной чувствительности в районе длины волны 600 нм.

### Заключение

Результаты калибровочных испытаний узкоугольного гиперспектрометра позволяют утверждать, что реальные технические характеристики прибора по своим значениям близки или практически совпадают с расчетными, приведенным в докладе. Так, например, достигнуто хорошее согласие с данными по спектральному диапазону, числу спектральных каналов и спектральному разрешению сенсора. Несколько худшие результаты были получены по величине пространственного разрешения, что связано с теми обстоятельствами, что средний размер пятен рассеяния точки гиперспектрометра равен 7 мкм.

## Калибровка узкоугольного гиперспектрометра

Такое пятно проецируется на два детекторных элемента матрицы с линейным размером 5,5 мкм, что в два раза ухудшает пространственное разрешение и, кроме того, определение разрешения методом «контрастного края» по реальному изображению обладает погрешностью, связанной с неидеальным контрастом такого края. В качестве одной из актуальных задач наших дальнейших исследований является доработка алгоритма автоматического определения координат центров спектральных линий для имеющихся спектральных ламп.