

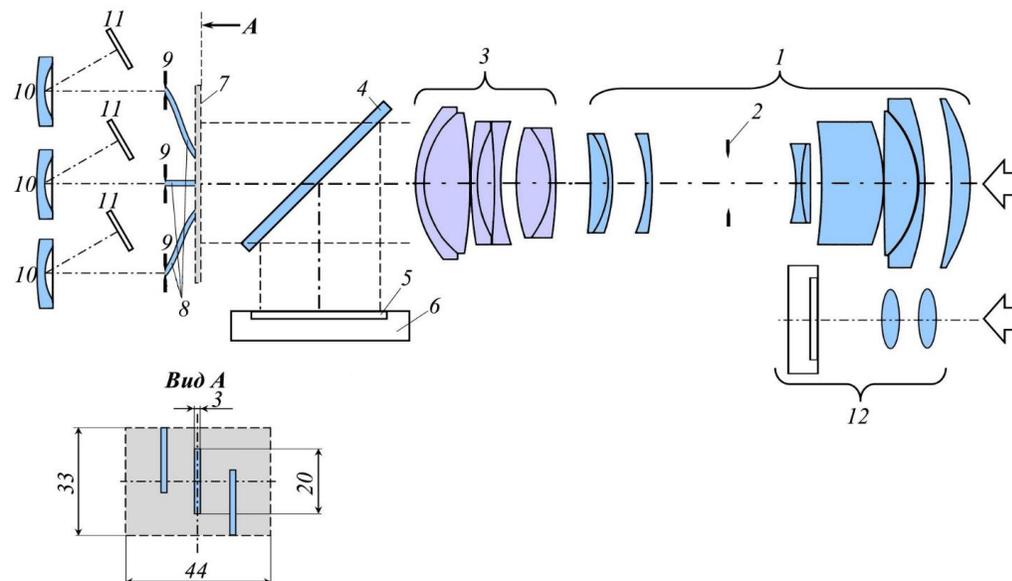
Особенности радиометрической калибровки спектрометров научной аппаратуры ВСС

*Красовская¹ О.О. Литвинович¹ Г. С., Мартинов¹ А.О.,
Смоленцева² Л. А., Юрина² О.А.*

¹Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

²Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королева, Королев, Российская Федерация

Научная аппаратура «ВСС»



- 1 – входной объектив;
- 2 – электромеханический затвор;
- 3 – конвертер;
- 4 – плоская полупрозрачная пластина узла светоделителя;
- 5 – цветная фотоприемная матрица;
- 6 – цифровой адаптер (задник);
- 7 – вторая плоскость изображения;
- 8 – световоды;
- 9 – входные щели полихроматоров;
- 10 – диспергирующие элементы (вогнутые голограммные решетки);
- 11 – приемные матрицы полихроматоров Baumer;
- 12 – камера видеосопровождения

Для космического эксперимента «Ураган» в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ по заказу ПАО «РКК «Энергия» была разработана научная аппаратура «Видеоспектральная система» (НА «ВСС») и с 2022 г. размещена на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). ВСС предназначен для получения цветных цифровых фотоизображений и спектральных характеристик подстилающей поверхности с борта МКС.

Характеристики спектрометров изображения

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Спектральный диапазон, нм | 400–950 |
| Спектральное разрешение, нм | 2,0–5,0 |
| Тип дифракционной решетки | вогнутая голограммная |
| Число штрихов, штр./мм | 315 |
| Разрешение, пиксель | 2044 × 2044 |

Радиометрическая калибровка НА «ВСС»

Радиометрическая калибровка служит для пересчета выходных характеристик спектрометров (отсчетов АЦП) в абсолютные величины спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ).

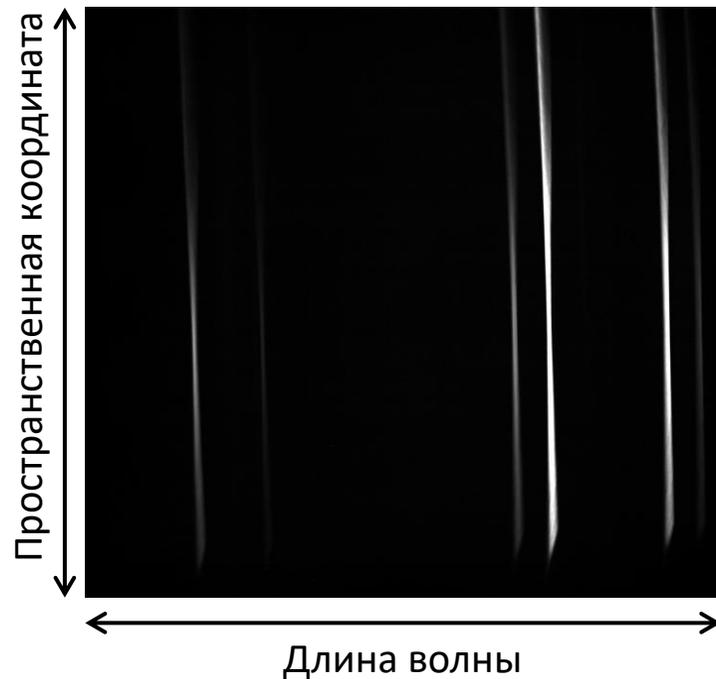
Калибровка включает в себя:

- калибровку по длинам волн;
- коррекцию наложения вторых порядков дифракции;
- калибровку по абсолютным величинам яркости.

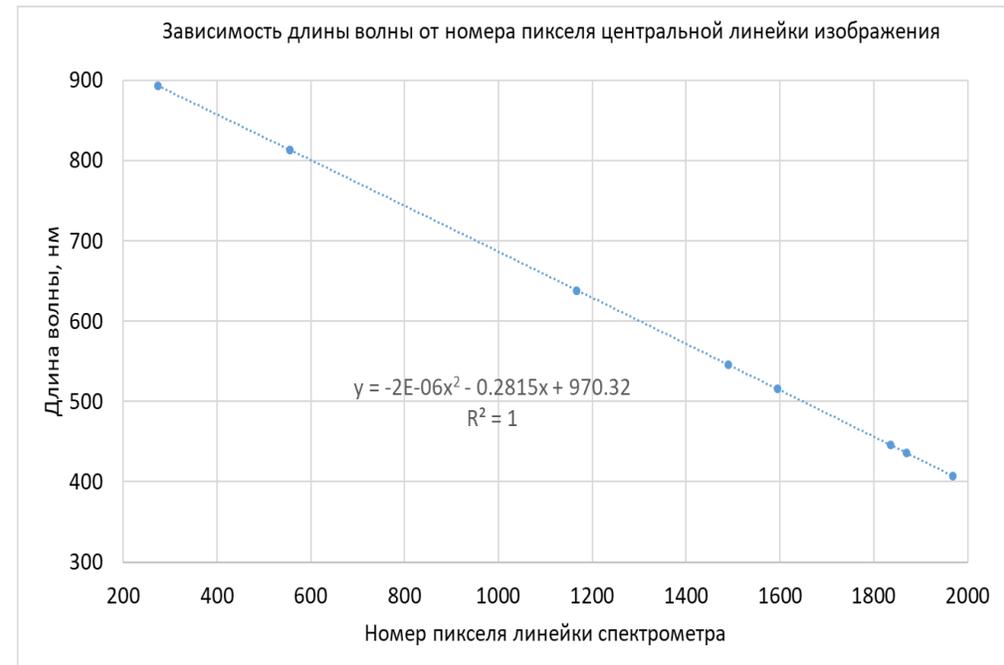
Калибровка по длинам волн

Калибровка заключается в нахождении зависимости длины волны излучения от номера пикселя детектора спектрометра. Для калибровки используются протяженные источники линейчатого спектра.

Калибровка осложняется необходимостью калибровки каждой строки изображения, получаемого спектрометром, аберрациями оптической схемы спектрометра. Для калибровки был разработан автоматический алгоритм калибровки матричных спектрометров по длинам волн [1].



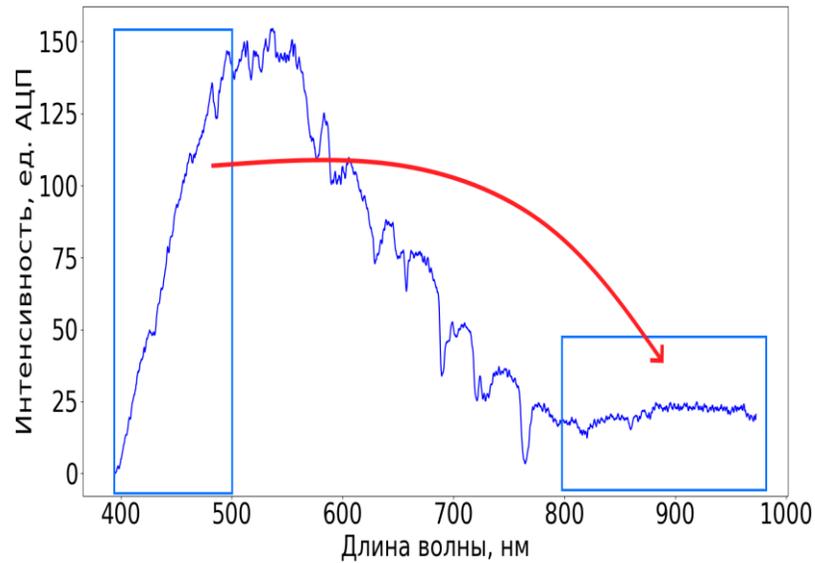
Спектр протяженного источника на базе ртутной лампы



Пример калибровки по длинам волн центральной линейки одного из спектрометров

1. Мартинов А.О. Алгоритм автоматического определения спектральных линий на подверженных аберрациям снимках при калибровке спектрометров изображения по длинам волн // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 135. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

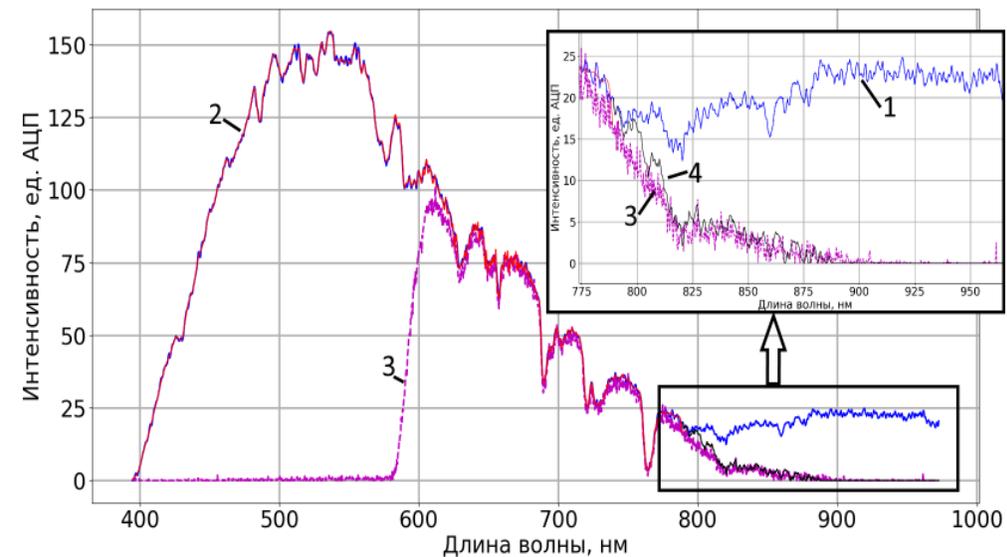
Коррекция вторых порядков дифракции



Из-за особенностей работы дифракционных спектрометров происходит наложение второго порядка дифракции «синей» части спектра на «красную», что требует коррекции для получения надежных спектральных данных.

2. Бручковская С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Катковский Л.В. АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ДИФРАКЦИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА В СПЕКТРОМЕТРЕ С ВОГНУТОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2019;86(4):620-626.

Для математической коррекции был разработан алгоритм [2]. Однако из-за вычислительных сложностей в применении к матричным спектрометрам была разработана упрощенная версия, представляющая собой вычитание «синей» части спектра, умноженной на экспериментально определенный зависящий от длины волны коэффициент, из «красной». Коэффициент определялся для условий измерений протяженных источников со сплошным спектром.



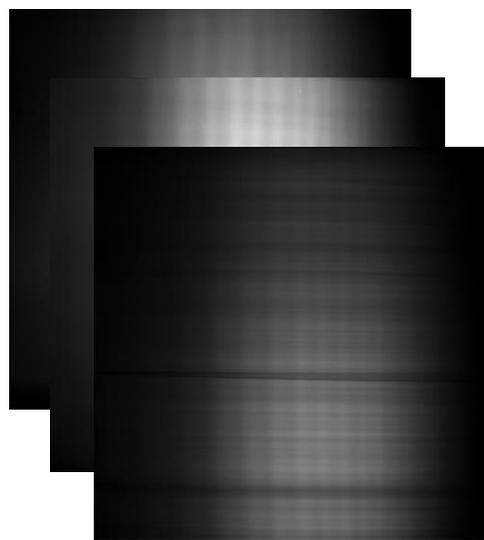
Результат коррекции наложения вторых порядков дифракции спектра яркости неба на примере одного из спектрометров ВСС:
1 – исходный спектр; 2 – «синяя» часть спектра, участвующая в расчетах; 3 – эталонный спектр яркости неба с аппаратной (фильтр КС-10) коррекцией; 4 – результат коррекции.

Радиометрическая калибровка

Радиометрическая калибровка спектрометров заключается в регистрации эталона с известным распределением яркости (СПЭЯ) по длинам волн. Проводится расчет коэффициента преобразования $k(\lambda)$ для перевода выходного сигнала спектрометров, зарегистрированного на каждом режиме работы, для каждой длины волны (отсчетов аналогово-цифрового преобразователя) в абсолютные единицы яркости СПЭЯ.



Эталонный излучатель



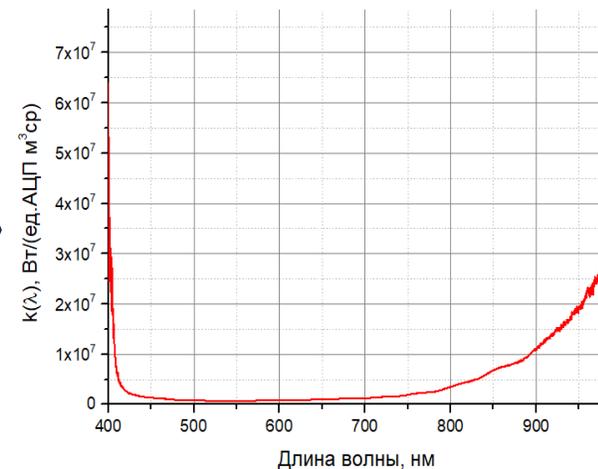
Получение массива данных для каждого режима работы спектрометра (экспозиция, усиление)



$$k(\lambda) = \frac{L^{\Phi C}(\lambda)}{\bar{V}(\lambda)_{BCC}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{BCC}^{ТЕМН}}$$

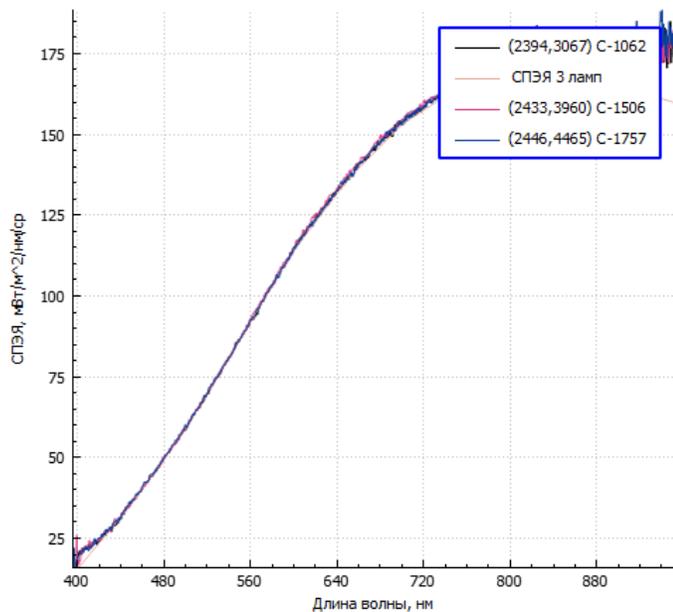
$L^{\Phi C}(\lambda)$ – значения СПЭЯ фотометрической сферы на длине волны λ , Вт/(м³·ср);
 $\bar{V}(\lambda)_{BCC}^{СИГН}$ – значения сигнала АЦП, регистрируемого спектрометром на длине волны λ от фотометрической сферы, единица АЦП;
 $\bar{V}(\lambda)_{BCC}^{ТЕМН}$ – значения темного сигнала АЦП, регистрируемого спектрометром на длине волны λ , единица АЦП.

Расчет коэффициента преобразования

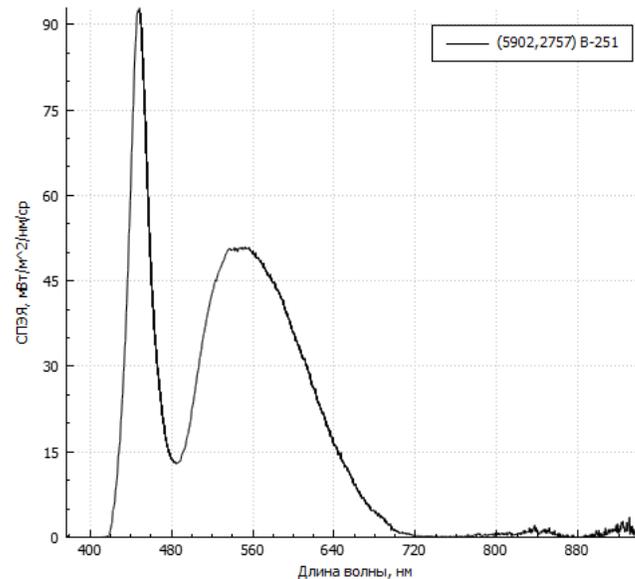


Итоговый коэффициент преобразования для одной строки детектора

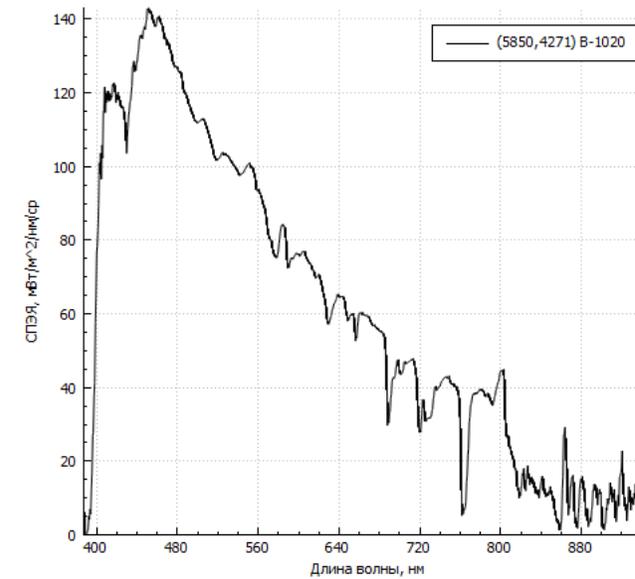
Результаты калибровки



Спектр эталонного излучателя



Спектр контрольно-поверочной аппаратуры



Спектр яркости небесной сферы

В настоящее время в рамках тестовых включений НА «ВСС» проводится съемка международных полигонов, по результатам которых будут сделаны расчеты и анализ расхождений измеренного спектра отражения полигонов с эталонными значениями.