

УДК 535.243.2+681.7

**Б. И. Беляев, Ю. В. Беляев, А. В. Домарацкий, Л. В. Катковский,  
Ю. А. Крот, А. В. Роговец, С. В. Хвалей**Науково-дослідна установа «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка»  
Белоруського державного університету

## **ФОТОСПЕКТРАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «УРАГАН»**

*Описується будова і робота фотоспектральної системи, розробленої і створеної для використання на борту міжнародної космічної станції у рамках космічного експерименту «Ураган». Приводяться розрахунки оптичних параметрів і результати лабораторних випробувань фотоспектральної системи, вимірювань її характеристик і калібровок.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Природные и техногенные катастрофы в различных регионах планеты, последствия чрезвычайных ситуаций (ЧС) требуют контроля как наземными, так и космическими системами наблюдения. Мониторинг опасных процессов и явлений в окружающей среде, проводимый по определенной программе из космоса методами дистанционного зондирования (ДЗ), даст возможность не только фиксировать ЧС и другие природные и антропогенные явления, но и прогнозировать их развитие, позволит снижать наносимый ими ущерб.

Основными целями космического эксперимента «Экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза природных и техногенных катастроф» (шифр «Ураган») являются: отработка методов визуальных наблюдений и регистрация с борта СМ РС МКС катастрофических явлений и их предвестников на Земле; разработка критериев классификации и дешифрирования признаков катастрофических явлений.

Конечная цель научной программы «Ураган» — выработка требований к наземно-космической системе предупреждения катастроф.

В результате реализации эксперимента «Ураган» в период работы экспедиций МКС 8 —

МКС 13 на Землю доставлены десятки тысяч цифровых изображений подстилающей поверхности Земли. Получен огромный объем информации, широко освещенный в научной печати [4–6]. Передача снимков через российский и американский каналы связи, а также доклады в сеансах связи о наблюдаемых катастрофических явлениях давали объективную информацию по оперативным задачам регистрации стихийных бедствий и состояния природной среды. Очевидным недостатком эксперимента «Ураган» в теперешнем виде остается его устаревшее техническое оснащение (главный инструмент — фотоаппаратура, получаемые данные — фотографии). Для развития методов мониторинга было принято решение о расширении состава оборудования.

В НИИ прикладных физических проблем Белгосуниверситета совместно с Институтом географии РАН разработана и изготовлена фотоспектральная система для установки на Российском сегменте МКС, предназначенная для регистрации спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн 350–1050 нм, однозначно «привязанных» к цветным изображениям высокого пространственного разрешения.

Задачи, решаемые с использованием фотоспектральных систем (ФСС): выбор характерных спектральных зон для решения диагностических задач; определение ареала распространения «пылевых» бурь из района озера Арал; определение

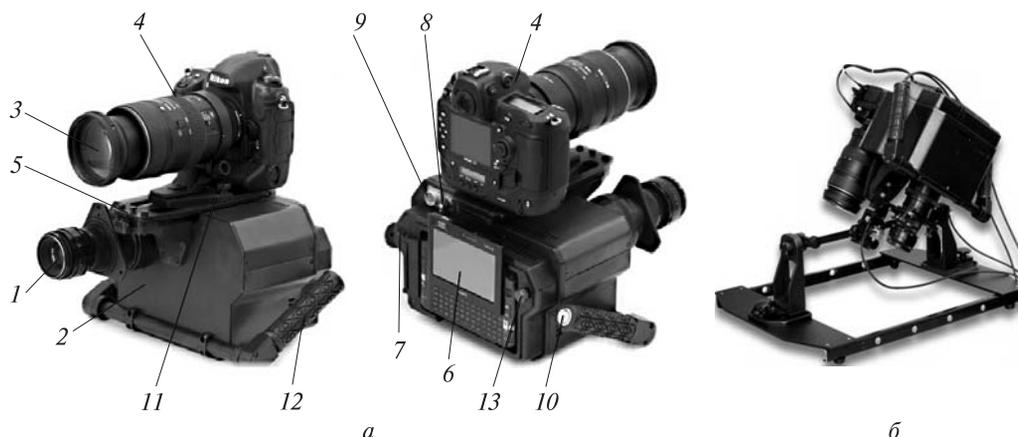
© Б. И. БЕЛЯЕВ, Ю. В. БЕЛЯЕВ, А. В. ДОМАРАЦКИЙ,  
Л. В. КАТКОВСКИЙ, Ю. А. КРОТ, А. В. РОГОВЕЦ,  
С. В. ХВАЛЕЙ, 2010

**Технические характеристики спектрорадиометра**

Параметр		Значение параметра спектрорадиометра
Название	Обозначение	
Диаметр входного объектива	$D_{\text{вх}}$	48.2 мм
Фокусное расстояние входного объектива	$f_{\text{вх}}$	135 мм
Относительное отверстие вх. об.	$\epsilon_{\text{вх}}$	0.36 (1:2.8)
Среднее пропускание объектива	$\tau_{\lambda}^{\text{вх}}$	0.9
Спектральный диапазон	$\lambda_{\text{min}} - \lambda_{\text{max}}$	350—1050 нм
Спектральное разрешение	$\Delta\lambda$	0.5 нм
Размер пикселя	$\Delta a \times \Delta b$	$8 \times 200$
Количество пикселей	$N$	3648 мкм
Ширина входной щели	$b_{\text{щ}}$	100 мкм
Средняя освещенность объекта,	$E_{\lambda}$	1.2 Вт/(м <sup>2</sup> ·нм)
Средний коэффициент отражения объекта	$\rho_{\lambda}$	0.1
Средний коэффициент отражения решетки	$\rho_{\lambda}^{\text{реш}}$	0.9
Площадь дифракционной решетки	$A_{\text{реш}}$	$56 \times 56$ мм
Количество штрихов решетки	$N_{\text{реш}}$	120 штр/мм
Период решетки	$d$	8.3 мкм
Радиус кривизны решетки	$R_{\text{реш}}$	250 мм
Расстояние от щели до решетки	$r_a$	282 мм
Обратная линейная дисперсия полихроматора	$D_{\lambda}^{-1}$	30 нм/мм
Охлаждение приемника		Нет (25 °С)
Максимальная спектральная чувствительность приемника	$S_{\text{max}}$	50000 В/(Дж/м <sup>2</sup> )
Пороговая чувствительность приемника (не хуже)	$B_{\lambda}^{\text{пор}}$	$5 \cdot 10^{-5}$ Вт/(см <sup>2</sup> ·мкм·ср)
Среднее темновое напряжение	$V_d$	2 мВ (при $t = 25^{\circ}\text{C}$ )
Средний шум считывания	$N_{\text{г}}$	8 $e^-$ /пкл
Среднее напряжение (ток) полезного сигнала (входного потока излучения)	$U_s (I_s)$	16 мВ ( $10^{12} e^-/c$ )
Время экспозиции для отношения сигнал/шум $S/N = 50$	$\tau$	< 1 мс
Напряжение насыщения	$V_{\text{sat}}$	600 мВ
Динамический диапазон CCD/МС	DR	300/24 дБ
Экспозиция насыщения		0.004 Лк·с
Выходной импеданс приемника	$R_{\text{out}}$	100 кОм

масштабов загрязнений (мониторинг объектов промышленной разработки и транспортировки нефти, зимний мониторинг индустриальных городов); регистрация темпов движения «зеленой волны» — фронта и тыла весеннего снеготаяния; исследование динамики изменения ландшафта

(зарастание пахотных земель, техногенное воздействие на природную среду); исследование крупных лесных массивов по определению породного состава; получение эталонных данных участков земной поверхности с различной растительностью.



**Рис. 1.** Внешний вид ФСС в двух ракурсах (а) и на кронштейне (б) для иллюминатора МКС с датчиками углов поворота: 1 – объектив МС, 2 – МС, 3 – объектив МРИ, 4 – МРИ, 5 – юстировочное устройство МРИ, 6 – планшетный компьютер МЭ, 7 – кнопка включения МС, 8 – разъем подключения МРИ, 9 – разъем подключения датчиков углов поворота кронштейна к МЭ, 10 – клавиша управления, 11 – кронштейн крепления МРИ, 12 – ручка с изменяемым положением, 13 – винт доступа к отсеку питания

## СОСТАВ И УСТРОЙСТВО ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Фотоспектральная система конструктивно выполнена в виде компактного переносного модуля (рис. 1), который включает:

- модуль спектрорадиометра (МС), состоящий из проекционного (входного) объектива, полихроматора, контроллера;
- модуль регистрации изображения (МРИ), в качестве МРИ используется цифровой фотоаппарат Nikon D2X с объективом Nikon 200 мм f/2G ED–1F AF–S VR Nikkor;
- модуль электроники (МЭ), представляющий собой планшетный компьютер (ПК) типа Sony VAIO VGN-UX390N.

Цифровой фотоаппарат МРИ типа КМОП (CMOS) оснащен сенсором размером  $23.7 \times 15.7$  мм. Разрешающая способность этого сенсора определяется количеством  $4288 \times 2848$  элементов (всего 12.4 Мпкл). Процесс регистрации данных с цифрового фотоаппарата осуществляется согласованно с процессом регистрации данных с МС во временных интервалах, заданных оператором в управляющей программе. Через меню управляющей программы оператор может задавать интервал съемки для МС и для МРИ, их временную привязку и количество требуемых снимков.

Модуль электроники обеспечивает: выдачу команд управления режимами работы МС и МРИ; прием служебной информации о режимах работы МС и МРИ; прием и хранение зарегистрированных данных от МС; прием, сжатие и хранение данных от МРИ, включая данные о дате и времени проведения съемки; выдачу информации о режимах работы ФСС на индикаторы контроля; выдачу зарегистрированных данных в бортовой компьютер поддержки научных экспериментов с записью на сменный жесткий диск; выполнение всех задач по обработке и хранению получаемых данных; управление работой ФСС в автоматическом режиме (без участия оператора) при размещении ФСС на кронштейне (ручной режим съемки осуществляется оператором с помощью встроенного ЖКИ-табло и клавиш управления).

Далее основное внимание будет уделено выбору и расчетам характеристик МС.

## РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

При выборе оптической МС были учтены поставленные требования: МС должен обеспечивать регистрацию не менее 1 спектра на кадр в диапазоне длин волн  $\lambda\lambda$  350–1050 нм со спект-

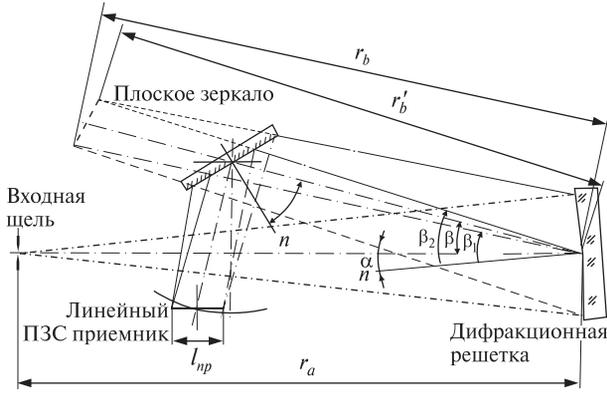


Рис. 2. Оптическая схема полихроматора МС ФСС

ральным разрешением не хуже 3÷5 нм; синхронизацию времени с бортовыми часами; приемник полихроматора спектро радиометра должен быть выполнен на основе ПЗС или фотодиодной линейки с числом элементов не менее 1024. Чувствительность спектро радиометра должна обеспечивать время интегрирования спектра не более 20 мс. Проекционный объектив МС должен обеспечивать спектро метрирование участка земной поверхности размером не более 400 × × 1000 м с высоты орбиты 400 км.

В фокусе входного объектива МС находится щель полихроматора. В состав полихроматора входит вогнутая отражательная дифракционная решетка, формирующая изображение входной щели в плоскости фотоприемной линейки (рис. 2). Решетка выполняет функции коллиматора, диспергирующего элемента и камерного объектива одновременно. Размер и количество чувствительных элементов ПЗС линейки в направлении дисперсии полихроматора определяют ширину, число и локализацию спектральных рабочих интервалов.

Уровень светового сигнала на входе спектро радиометра будет определяться источником освещения, в качестве которого выступает естественное дневное освещение Солнцем и спектральными коэффициентами отражения исследуемых объектов (подстилающих поверхностей).

Для полихроматора с вогнутой дифракционной решеткой важным параметром, определяющим как спектральное разрешение, так и энергетику спектро метра, является обратная линей-

ная дисперсия, для которой справедливо приближенное выражение

$$D^{-1} \equiv \frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{mnr_b} \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2},$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего излучения;  $l$  — расстояние в плоскости приемника,  $n$  — плотность штрихов решетки,  $m$  — порядок дифракции,  $\beta_1, \beta_2$  — углы дифракции для длин волн начала и конца рабочего спектрального диапазона,  $r_b$  — расстояние от решетки до приемника (рис. 2).

Минимальная ширина щели  $b_{щ}^{\min}$  не может быть меньше дифракционного предела объектива спектро метра, равного диаметру центрального кружка Эри, т. е.

$$b_{щ}^{\min} \geq d_{\text{Эри}} = 2.44 \lambda_{\max} / \varepsilon_{\text{вх}}.$$

$\varepsilon_{\text{вх}} = D_{\text{вх}} / f_{\text{вх}}$  — относительное отверстие входного объектива,  $D_{\text{вх}}$  — диаметр входного объектива,  $f_{\text{вх}}$  — его фокусное расстояние.

Дифракционное рассеяние в плоскости ПЗС-приемника приводит к появлению оптической помехи со стороны соседнего спектрального канала. Поэтому ширина пикселя  $\Delta a$  должен быть не меньше диаметра  $d_{\text{Эри}}^{\text{реш}}$  для выходной дифракционной решетки, который составляет 5—12.5 мкм (в зависимости от  $\lambda$ ). Если взять  $\Delta a \geq 3 d_{\text{Эри}}^{\text{реш}}$ , то взаимовлиянием соседних спектральных каналов можно пренебречь, поскольку в этом случае на пикселе будет сосредоточено не менее 90 % всей энергии светового пучка, соответствующего ширине пикселя  $\Delta a$ . При этом желательно, чтобы размеры щели  $h_{щ}, b_{щ}$  удовлетворяли равенству

$$\sqrt{h_{щ} b_{щ}} = \Delta a \frac{r_a}{r_b} \approx \Delta a,$$

где  $r_a$  — расстояние от входной щели до плоскости решетки.

Ширина спектрального интервала, соответствующая выходной щели (пикселю)  $\Delta \lambda_1 = \Delta a D^{-1}$  полихроматора, характеризует предельно достижимое спектральное разрешение спектро метра. Суммарную полуширину линии, регистрируемой спектро метром, в приближении гауссова профиля линии можно представить в виде

$$\Delta \lambda = \sqrt{\Delta \lambda_{щ}^2 + \Delta \lambda_{np}^2 + \Delta \lambda_{л}^2}.$$

Здесь  $\Delta\lambda_{\text{ш}}$  — полуширина, обусловленная конечными размерами входной и выходной щелей спектрометра, определяемая шириной большей из щелей,  $\Delta\lambda_{\text{пр}}$  — полуширина предельного разрешения спектрометра, определяемая аберрациями и дифракцией,  $\Delta\lambda_{\text{л}}$  — естественная полуширина спектральной линии;  $\Delta\lambda_{\text{ш}} = \max(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2)$ , где  $\Delta\lambda_1 = D^{-1}\Delta a$ ,  $\Delta\lambda_2 = D^{-1}b'_{\text{щ}}$ ,  $\Delta\lambda_{\text{пр}} = \lambda/N_{\text{реш}}$ ,  $N_{\text{реш}}$  — общее число штрихов решетки,  $b'_{\text{щ}}$  — ширина изображения входной щели в плоскости приемника. Для спектрорадиометра спектральная полоса пропускания может быть оценена по следующей формуле:

$$\Delta\lambda = \frac{b_{\text{щ}} \cos \alpha}{mnr_a}. \quad (1)$$

При энергетических расчетах рассматриваются, как правило, потоки энергии на отдельном пикселе приемника. Шумовой заряд пикселя (или количество шумовых электронов) складывается из нескольких составляющих. Наибольшие вклады дают три составляющие: фотонный (радиационный) шум принимаемого излучения, темновой (тепловой) шум и шум считывания.

Количество фотоэлектронов, образующих фотонный шум, флуктуирует, подчиняясь распределению Пуассона, в соответствии с которым количество шумовых фотонов в самом сигнале равно корню квадратному из числа падающих за время экспозиции  $\tau$  фотонов. Темновой шум характеризуется средним квадратичным значением «шумовых» электронов  $N_{\text{темн}}$ , которое выражается через темновой ток  $I_{\text{темн}}$  (в электрон/(пкл·с)):  $N_{\text{темн}} = I_{\text{темн}}\tau$ . Количество термоэлектронов также подчиняется распределению Пуассона. Шум считывания является комбинацией шумов компонентов системы, присущих процессу преобразования накопленного заряда ячейки в сигнал выходного напряжения, его усиления и последующего аналого-цифрового преобразования. Он выражается числом электронов на пиксель, возникающих при одном цикле считывания  $N_{\text{сч}}$ .

Запишем выражение для отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) приемной линейки полихроматора в виде [2]:

$$SNR = \frac{F_{\lambda}^{\text{пикс}} Q_{\lambda} \tau T_{\text{общ}}(\nu)}{\left[ (F_{\lambda}^{\text{пикс}} + F_{\lambda}^{\text{б}}) Q_{\lambda} \tau T_{\text{общ}}(\nu) + I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2 \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

где  $F_{\lambda}^{\text{пикс}}$  — падающий поток фотонов на приемнике (измеряемый в фот/(пкл·с)),  $Q_{\lambda}$  — квантовая эффективность, используемая в качестве характеристики чувствительности приемника,  $F_{\lambda}^{\text{б}}$  — поток фотонов от фоновых помех (например, рассеянный свет),  $T_{\text{общ}}(\nu)$  — функция передачи модуляции (ФПМ) прибора в целом,  $\nu$  — пространственная частота,  $T_{\text{общ}}(\nu)$  может быть найдена как произведение ФПМ отдельных звеньев системы: среды распространения излучения, входной оптики, фотоприемника и т. д. Поскольку мы рассматриваем основное энергетическое соотношение в плоскости фотоприемника (для отдельного пикселя), то вклады в ФПМ  $T_{\text{общ}}(\nu)$  электронного тракта и приемной матрицы необходимо исключить. Поскольку атмосферная составляющая ФПМ для дальности видимости в 10 км и выше в среднем по спектру равно около 0,8, далее для простоты считаем ее равной 1. Выражение для общей ФПМ, входящей в (2), примет вид [8]

$$T_{\text{общ}}(\nu) = T_{\text{об}}(\nu) = \frac{2}{\pi} (\arccos \delta - \delta \sqrt{1 - \delta^2}),$$

при  $\delta = \frac{\lambda f_{\text{вх}} \nu}{D_{\text{вх}}} \leq 1$ .

Введем для удобства рассмотрения величину тока полезного сигнала (на пикселе), соответствующего регистрируемому излучению:

$$I_c = F_{\lambda}^{\text{пикс}} Q_{\lambda} T_{\text{общ}}(\nu). \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) примет вид (для простоты опущен поток фоновых помех):

$$SNR = \frac{I_c \tau}{(I_c \tau + I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

При спектрометрировании протяженного объекта, если входная щель полихроматора полностью заполнена его изображением, спектральную фотонную яркость входной щели  $B_{\lambda}^{\text{ш}}$  можно выразить через фотонную спектральную яркость источника излучения  $B_{\lambda}$  (находящегося в бесконечности), относительное отверстие входного объектива и пропускание  $\tau_{\text{вх}}$  следующим образом:

$$B_{\lambda}^{\text{ш}} = \frac{B_{\lambda} \tau_{\text{вх}} \varepsilon_{\text{вх}}^2}{4}, \quad (5)$$

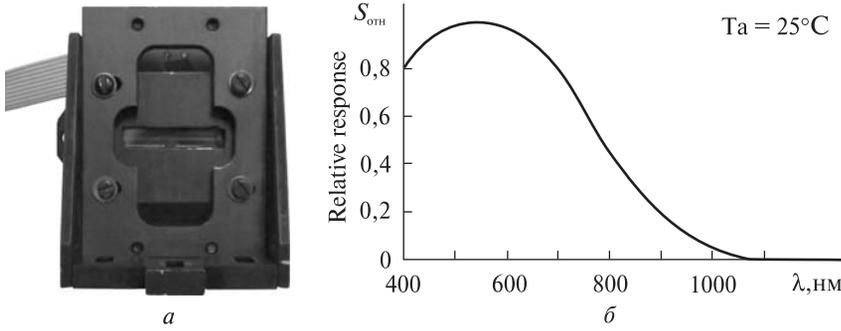


Рис. 3. Приемник излучения МС ФСС на базе ПЗС-линейки фирмы «Toshiba» (а) и его относительная спектральная чувствительность  $S_{отн}$  (б)

Фотонный поток излучения  $F_{\lambda}^{реш}$ , падающий на дифракционную решетку в спектральном интервале  $\Delta\lambda$  (спектральное разрешение спектро-радиометра), равен

$$F_{\lambda}^{реш} = B_{\lambda}^{ш} \Delta\lambda b_{ш} h_{ш} \frac{A_{реш}}{r_a^2}.$$

После решетки поток будет ослаблен потерями при отражении и дифракции, что учтем фактором эффективности решетки  $\eta_{\lambda}$ . Вогнутая отражательная решетка фокусирует изображение щели на приемник. Выходная щель, роль которой играет пиксель приемной матрицы, «вырезает» из спектра, соответствующего изображению щели, часть, пропорциональную площади пикселя  $(\Delta a \Delta b)$  ( $\Delta b$  — вертикальный размер пикселя) [7]. Таким образом, поток излучения сплошного спектра на пикселе приемника будет равен [7, 8]:

$$F_{\lambda}^{пикс} = B_{\lambda}^{ш} \eta_{\lambda} \Delta\lambda \frac{A_{реш}}{r_a^2} b_{ш} h_{ш} \frac{\Delta a \Delta b}{b'_{ш} h'_{ш}}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что абберационными и дифракционными расширениями изображения щели можно пренебречь, а в пределах ширины щели и пикселя спектральными изменениями величин  $B_{\lambda}^{ш}$ ,  $\eta_{\lambda}$ ,  $D^{-1}$ , а также чувствительности приемника можно пренебречь.

Подставляя в (6) выражения для размеров изображения щели  $b'_{ш}, h'_{ш}$ , полосы пропускания (1) и яркости щели (5), получаем

$$F_{\lambda}^{пикс} = \frac{B_{\lambda} \tau_{вх} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{ш} (\Delta a \Delta b) \cos \beta}{4r_b^2 r_a m n}. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (3) для величины тока полезного сигнала получаем

$$I_c = \frac{B_{\lambda} \tau_{вх} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{ш} (\Delta a \Delta b) Q_{\lambda} \cos \beta}{4r_b^2 r_a m n} T_{общ} (v). \quad (8)$$

Уравнение (4) можно разрешить относительно времени экспозиции  $\tau$  при заданных остальных параметрах:

$$\tau = \frac{SNR^2}{2I_c} \left[ \left( 1 + \frac{I_{темн}}{I_c} \right) + \sqrt{\left( 1 + \frac{I_{темн}}{I_c} \right)^2 + \frac{4N_{сч}^2}{SNR^2}} \right],$$

Для используемого нами приемника «Toshiba TCD1304DG» известна относительная спектральная чувствительность (рис. 3), а также интегральная фотометрическая чувствительность  $S^{\Phi} = 160 \text{ В/лк}\cdot\text{с}$ .

Для получения квантовой эффективности приемника  $Q_{\lambda}$ , используемой в (8), выразим последнюю через интегральную фотометрическую чувствительность  $S^{\Phi}$ , которая определяется выражением

$$S^{\Phi} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda / K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

где  $\lambda_1 = 350 \text{ нм}$ ,  $\lambda_2 = 1050 \text{ нм}$ ,  $\Phi(\lambda)$  — спектр (излучательная способность) источника (в данном случае — флуоресцентная лампа дневного света),  $V(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность стандартного глаза,  $S(\lambda) = V_s / (E_{\lambda}^{пикс} \tau_c)$  — абсолютная радиометрическая спектральная чувствительность приемника,  $V_s$  — выходной сигнал (напряжение) приемника,  $E_{\lambda}^{пикс}$  — освещенность приемника в спектральной полосе  $\Delta\lambda$  пропускания,  $\tau_c$  — время экспозиции при калибровке приемника.

Радиометрическую спектральную чувствительность можно представить в виде

$$S(\lambda) = S_{max} \cdot S_{отн}(\lambda),$$

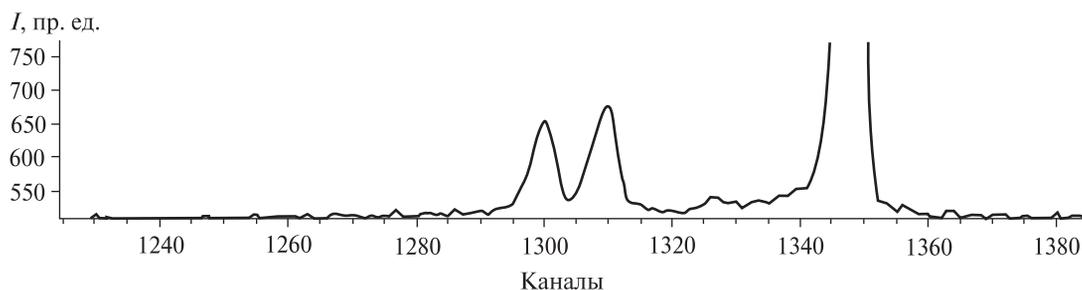


Рис. 4. Регистрация линий излучения ртути 577.0, 579.0 нм и гелия 587.6 нм

где  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность приемной линейки (рис. 3).

Вычисления с использованием всех входящих в (9) спектральных функций и данных для  $S^{\Phi}$  дают значение максимальной чувствительности приемника  $S_{\text{max}} = 50000(\text{Дж}/\text{м}^2)$ .

В соответствии с определениями чувствительности  $S(\lambda)$  и квантовой эффективности  $Q_{\lambda}$  связь между ними выражается соотношением

$$Q_{\lambda} = \frac{hc\gamma}{\lambda(\Delta a \Delta b)} S(\lambda),$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $e$  — заряд электрона,  $\gamma = \tau_c / (R_{\text{out}} e)$  — фактор конверсии величины напряжения в количество электронов,  $R_{\text{out}}$  — выходной импеданс приемника.

Исходные данные и дополнительные параметры, необходимые для расчета оптических характеристик спектрометра ФСС, а также параметры, полученные в результате настоящих расчетов, приведены в таблице.

Фотометрические градуировки ФСС были проведены на метрологическом комплексе «Камелия-М» [1] в НИИ ПФП БГУ. Фотометрическая градуировка ФСС выполнена по образцовому средству измерений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) некогерентного оптического излучения сплошного спектра.

При фотометрических градуировках ФСС были определены: рабочий спектральный диапазон; пороговая чувствительность в пределах рабочего спектрального диапазона; динамический диапазон по световому потоку в пределах рабочего спектрального диапазона; верхний предел измерения спектральной плотности энергетической яркости в пределах рабочего спектраль-

ного диапазона; погрешности измерения спектральной плотности энергетической яркости в пределах рабочего спектрального диапазона.

Спектрометр хорошо разрешает линии излучения ртути (577.0 и 579.0 нм) (рис. 4), т. е. реальное спектральное разрешение не хуже 2 нм.

Поле зрения спектрометра в сагиттальной плоскости будет определяться высотой пикселя приемной линейки, так как высота щели полихроматора намного больше и составляет 4 мм. Для вогнутой сферической дифракционной решетки с радиусом кривизны 250 мм и расположением входной щели и приемной линейки приблизительно на круге Роуланда оно составляет  $0.092^\circ$ .

Вогнутые дифракционные решетки при такой оптической схеме полихроматора обладают астигматизмом, который не был указан в паспортных данных. Для нахождения реального поля зрения были проведены прямые его измерения в сагиттальной плоскости, для чего измерения проводились при скрещенных щелях монохроматора комплекса «Камелия-М» и спектрометра. При такой схеме эксперимента макетируется ситуация излучающей точки входной щели полихроматора. В результате измерений при скрещенных щелях была получена зависимость уровня сигнала от угла поворота спектрометра, представленная на рис. 5. Столь большой угол поля зрения прибора в данной плоскости (около  $1^\circ$ ) можно объяснить лишь астигматизмом дифракционной решетки.

Была определена пороговая СПЭЯ, регистрируемая прибором (рис. 6), и средняя квадратичная погрешность измерений СПЭЯ спектрометром (рис. 7).

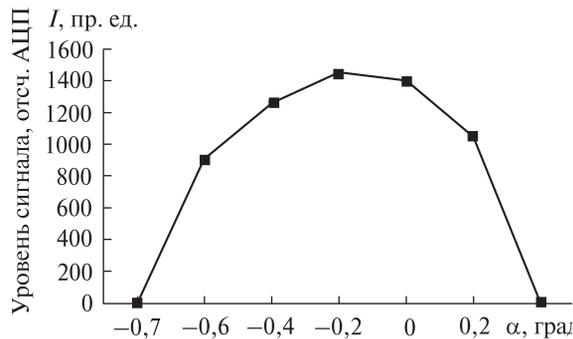


Рис. 5. Зависимость уровня сигнала  $S_{\text{отн}}$  от угла поворота  $\alpha$  в сагиттальной плоскости

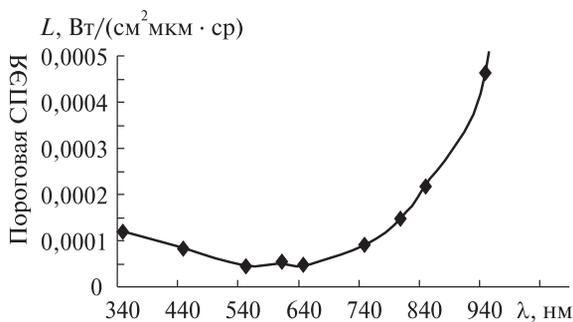


Рис. 6. Пороговая СПЭЯ, регистрируемая прибором

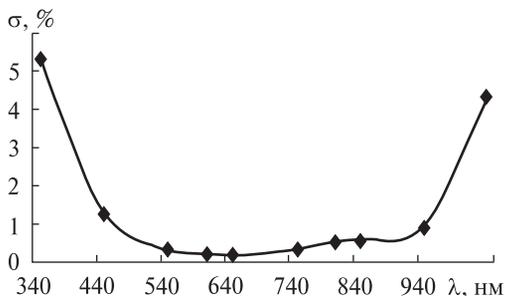


Рис. 7. Средняя квадратичная погрешность  $\sigma$  измерений СПЭЯ

Так же был определен динамический диапазон измерений МС:  $D = 10 \lg(L_{\text{max}}/L_{\text{min}}) = 24$  дБ.

Нами разработана методика [3] интерполяции пространственно-спектральных данных, в результате применения которой информация, содержащаяся в RGB-изображениях и спектрах высокого разрешения в 4–6 областях (точках) на одном изображении, становится близкой по своей информативности к данным, получаемым видеоспектрометром с несколькими десятками спектральных каналов.

Сочетание фотоаппаратуры высокого пространственного разрешения и спектрорадиометра высокого спектрального и пространственного разрешения позволит повысить информативность регистрируемых данных в КЭ «Ураган» и проводить более точную идентификацию, классификацию и определение параметров подстилающих поверхностей и объектов.

1. Беляев Б. И., Катковский Л. В. Оптическое дистанционное зондирование. — Минск: БГУ, 2006. — 455 с.
2. Беляев Б. И., Катковский Л. В., Хвалей С. В. Расчет параметров спектрофотометрического комплекса для измерения яркости свечений верхней атмосферы из космоса // Журн. прикл. спектр. — 2008. — 75, № 1. — С. 125–133.
3. Беляев Ю. В., Катковский Л. В., Хвалей С. В., Хомицевич А. Д. Повышение информативности спектрозональных изображений растительных объектов // Журн. прикл. спектр. — 2007. — 74, № 5. — С. 670–676.
4. Десинов Л. В., Беляев М. Ю., Шарипов С. Ш. и др. Мониторинг природных катастроф с МКС в 2005 году // Сб. тез. Третьей всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 14–17 ноября 2005 г.
5. Десинов Л. В., Ведешин Л. Программа «Ураган» стремится к интеграции с ГИС // ArcReview. — 2003. — № 3 (26).
6. Побединская М. «Ураган» предупредит об ураганах... и других природных катастрофах // Новости космонавтики. — 2003. — № 2.
7. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 250 с.
8. The infrared and electro-optical systems handbook / Ed. by G. J. Zissis. — Environment research Institute of Michigan, USA., 1993. — Vol. 1. — 373 p.

Надійшла до редакції 01.10.09

B. I. Belyaev, Yu. V. Belyaev, A. V. Domaratskii, L. V. Katkovskii, Yu. A. Krot, A. V. Rogovets, S. V. Khvalei

THE PHOTOSPECTRAL SYSTEM FOR THE SPACE EXPERIMENT «URAGAN»

We describe the arrangement and operation of the photospectral system developed for the use aboard the International Space Station within the framework of the space experiment «Uragan». Our calculations for optical parameters are given. Some results for laboratory testing of the photospectral system as well as for measurements of its characteristics and calibrations are presented.