

# Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр

А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В. Чумаков, А.В. Домарацкий

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета  
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 26.11.2018  
Принята к печати 05.02.2019

В последнее время в мировой практике аэрокосмического мониторинга Земли наблюдается все более активное внедрение методов и средств гиперспектральной съемки. Таким образом, создание систем, предназначенных для регистрации гиперспектральных данных и методов их обработки, является актуальной задачей дистанционного зондирования Земли. Целью работы являлась разработка и создание маломассогабаритного спутникового модульного гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона, предназначенного для получения информации дистанционного зондирования Земли с целью постоянного обновления данных о состоянии природной среды и объектов инфраструктуры видеоспектральными методами с возможностью комплексного изучения как спектральных, так и пространственных характеристик наблюдаемых объектов.

Представлен маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр. К отличительным особенностям аппаратуры относятся высокое спектральное разрешение и малые габариты. Гиперспектрометр включает в себя два основных модуля: оптический модуль и модуль электроники. Особенностью конструкции оптического модуля является использование в полихроматоре вогнутой голографической дифракционной решетки. Модуль электроники построен на основе одноплатного компьютера. Представлено их описание и конструктивные особенности. Приведена схема формирования гиперкуба и программное обеспечение для его дальнейшей обработки. Представлено разработанное техническое обеспечение (контрольно-поверочная аппаратура, имитатор космического эксперимента и система пространственного сканирования) для проверки работоспособности, а также проведены тестовые съемки.

Стоит отметить чрезвычайно малые габариты для такого класса устройств по сравнению с аналогами, а также виброустойчивость аппаратуры.

**Ключевые слова:** гиперспектрометр, дистанционное зондирование, гиперкуб, спектр.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

---

**Адрес для переписки:**

А.О. Мартинов  
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета  
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь  
e-mail: antonmartenov@gmail.com

---

**Address for correspondence:**

A.O. Martinov  
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,  
Belarusian State University,  
Kurchatova str., 7, Minsk 220045, Belarus  
e-mail: antonmartenov@gmail.com

---

**Для цитирования:**

А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В. Чумаков,  
А.В. Домарацкий.  
Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 1. – С. 32–41.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

---

**For citation:**

A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov,  
A.V. Damaratski.  
[The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer].  
Devices and Methods of Measurements.  
2019, vol. 10, no. 1, pp. 32–41 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

# The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer

A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov, A.V. Damaratski

A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,  
Belarusian State University,  
Kurchatova str., 7, Minsk 220045, Belarus

Received 26.11.2018

Accepted for publication 05.02.2019

## Abstract

Recently in the world practice of aerospace monitoring of the Earth there has been an increasingly active using of methods and devices of hyperspectral imaging. Thus creation of systems designed for recording hyperspectral data and methods for their processing is an actual task for remote sensing of the Earth. The aim of the article was to develop and create a small-sized satellite modular hyperspectrometer in visible and near infrared range, designed to receive information on remote sensing of the Earth in order to constantly update data about state of natural environment and infrastructure objects using video-spectral methods with the possibility of comprehensive study of both spectral and spatial characteristics of the observed objects.

A small-scale satellite modular hyperspectrometer has been developed. The distinctive features of the equipment include high spectral resolution and small dimensions. A hyperspectrometer includes two main modules: an optical module and an electronics one. The design feature of the optical module is the use of a concave holographic diffraction grating in a polychromator. The electronics module is based on a single board computer. Their description and design features, a scheme for the formation of a hypercube and software for its further processing are presented in the paper. The developed hardware (test equipment, a space experiment simulator and a spatial scanning system) for efficiency testing is presented also, as well as test measurements were conducted.

It is worth noting the extremely small dimensions for this class of devices in comparison with analogues as well as the vibration resistance of the equipment.

**Keywords:** hyperspectrometer, remote sensing, hypercube, spectrum.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

---

### Адрес для переписки:

А.О. Мартинов  
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета  
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь  
e-mail: antonmartenov@gmail.com

### Address for correspondence:

A.O. Martinov  
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,  
Belarusian State University,  
Kurchatova str., 7, Minsk 220045, Belarus  
e-mail: antonmartenov@gmail.com

### Для цитирования:

А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В. Чумаков,  
А.В. Домарацкий.  
Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 1. – С. 32–41.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

### For citation:

A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov,  
A.V. Damaratski.  
[The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer].  
Devices and Methods of Measurements.  
2019, vol. 10, no. 1, pp. 32–41 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

## Введение

В связи с активизацией разработки средств и программ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с авиакосмических носителей и повышения их информативности созданию гиперспектральных систем уделяется повышенное внимание во всех развитых странах. Наличие большого количества узких спектральных полос в гиперспектральных изображениях позволяет не только применять эффективные методы классификации [1–3], но и открывает новые возможности, недоступные для мультиспектральных данных. Так, в работах [4, 5] описываются преимущества гиперспектральных данных над мультиспектральными в дистанционном зондировании почв и растительности. В работах [6, 7] описываются методы оценки состояния ледового покрова и методы мониторинга экологического состояния рек и водоемов.

Перед разработкой модульного гиперспектрометра (МГС) были проведены патентные исследования с целью сопоставительного анализа показателей технического уровня объекта разработки с отечественными и зарубежными объектами аналогичного назначения. В патентном анализе рассматривались гиперспектральные системы США, Канады, РБ, РФ [8] и других стран. По результатам исследования модельного ряда таких систем, как *AVIRIS*, *CASI*, *AISA*, *APEX*, *HuSpec* выяснено, что даже *AISA EAGLE* [9], который является чрезвычайно компактным самолетным гиперспектрометром, имеет массу 20,5 кг (6,5 кг оптический модуль и 14 кг – компьютер для обработки данных). Большинство остальных систем имеет массу 50 кг и выше.

Достигнутый в настоящее время уровень высокотехнологичных компонентов для создания быстродействующих электронно-оптических детекторов позволяет создавать малогабаритную бортовую аппаратуру ДЗЗ, которая с малых космических аппаратов и авиационных средств способна решать задачи по спектральному и пространственному позиционированию характеристик разнообразных оптических событий.

Целью данной работы являлось создание гиперспектральной системы малых габаритов, которая построена на модульном принципе. Использование данных МГС позволит получать высокоинформативный поток данных ДЗЗ, решая при этом задачи классификации, распознавания, диагностики и количественной оценки

параметров состояния различных объектов природно-техногенной сферы.

## Конструкция модульного гиперспектрометра

МГС предназначен для регистрации в автономном режиме с борта летательных аппаратов оптических характеристик подстилающей поверхности Земли при мониторинге состояния и пространственной структуры природно-антропогенных наземных комплексов. МГС включает в себя:

- модуль оптический;
- модуль электроники;
- систему пространственного сканирования.

Модуль оптический (МО) – полихроматор с вогнутой дифракционной решеткой (ДР), входным объективом и матричным приемником излучения на область 0,40–0,95 мкм предназначен для регистрации спектральных изображений в плоскости приемника. Конструктивно МО представляет собой жесткую конструкцию с общим основанием и внешним корпусом, в котором размещен полихроматор с матричным приемником излучения. Входной объектив фокусирует излучение внешней среды на входную щель полихроматора, на месте выходной щели полихроматора расположен матричный приемник оптического излучения (рисунок 1).

Обратная линейная дисперсия полихроматора с вогнутой ДР определяет энергетику спектрометра и спектральное разрешение. Этот параметр можно вычислить по приближенной формуле (10):

$$D^{-1} \equiv \frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{mnr_b} \cdot \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2} = \frac{10^6 \text{ нм}}{315 \cdot 99,5 \text{ мм}} \cos \left( \frac{0,073046 + 0,148059}{2} \right) = 31,7 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}, \quad (1)$$

где  $n$  – плотность штрихов решетки;  $m$  – порядок дифракции;  $r_b$  – расстояние от решетки до приемника;  $\beta_1, \beta_2$  – углы дифракции для длин волн начала и конца рабочего спектрального диапазона [10].

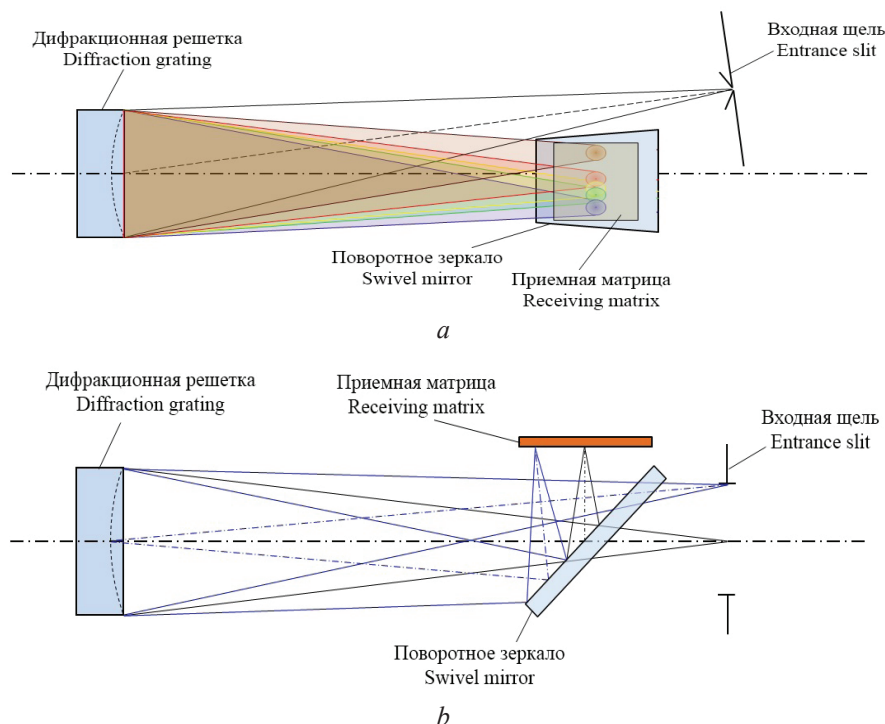
Спектральное разрешение может быть оценено по следующей формуле:

$$\Delta\lambda = \frac{b_s \cos \alpha}{mnr_a} = \frac{0,1 \text{ мм} \cdot \cos(0,184272)}{1 \cdot 315 \text{ мм}^{-1} \cdot 100 \text{ мм}} = 3,1 \text{ нм}, \quad (2)$$

где  $b_s$  – ширина входной щели полихроматора;  $\alpha$  – угол между нормалью ДР и центром входной

щели;  $r_a$  – расстояние от решетки до щели. На аттестованном метрологическом комплексе «Камея» были проведены спектральные измерения с целью определения спектральной разрешающей способности устройства. На МГС

посылалось монохроматическое излучение с узкой спектральной шириной (около 0,5 нм) и определялась аппаратная функция полихроматора. По итогам измерений спектральное разрешение МГС составило 4,5 нм.



**Рисунок 1** – Оптическая схема матричного полихроматора: *a* – меридиональное сечение; *b* – сагиттальное сечение  
**Figure 1** – Optical scheme of a matrix polychromator: *a* – meridional section; *b* – sagittal section

Особенностью конструкции МО является использование в полихроматоре вогнутой голографической ДР «Flat Field and Imaging Gratings Type IV». Эта решетка антиастигматическая и создавалась для применения в гиперспектрометрах. Решетки такого типа изготавливаются со штрихами, которые не являются ни равномерно расположенными, ни параллельными, и оптимизированы с помощью компьютера для формирования почти идеальных изображений входной щели на плоскости детектора [11]. В этой ДР для крайних и средней длин волн обеспечивается нулевое, для остальных – минимальное значение астигматизма, что позволяет увеличить пространственное разрешение разрабатываемого на основе такой решетки гиперспектрометра. Использование вогнутой голографической ДР снижает габариты оптического модуля практически в два раза по сравнению с полихроматором, в котором используется плоская ДР, поскольку отпадает необходимость в использовании камерного и коллимационного объектива. Вогнутая ДР выполняет функции обоих объективов (что важно

для маломассогабаритных приборов). Используемая решетка закреплена в специальном держателе, который с помощью винтов облегчает процесс юстировки прибора. Конструктивно элементы МО (ДР, входная щель, приемник излучения) крепятся на жесткую раму, что повышает ударо- и виброустойчивость разрабатываемого оборудования. В качестве приемника излучения, регистрирующего спектры подстилающей поверхности, используется CMOS камера MXGC40 с приемной матрицей CMOSIS CMV4000. Благодаря выбранной конструкции (минимальному количеству оптических элементов) МГС обладает повышенной виброустойчивостью. Технические характеристики МО представлены в таблице.

Модуль электроники (МЭ) на основе одноплатного компьютера служит для управления режимами работы оптического модуля, сжатия и передачи данных в бортовой компьютер микроспутника. МЭ состоит из компьютера «Tibis», контроллера полихроматора, блока питания и располагается в отдельном корпусе. Внешний вид МО и МЭ представлены на рисунке 2.

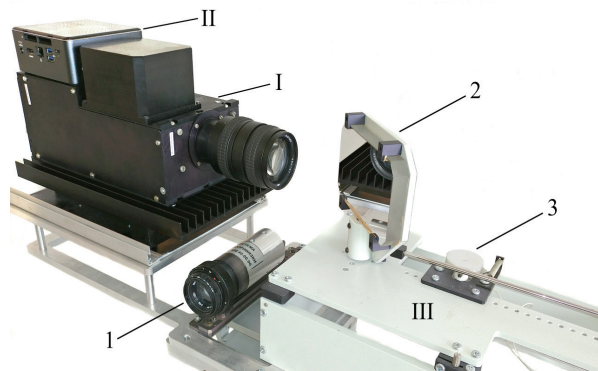
Компьютер имеет следующие характеристики: памяти *DDR4*, *SSD* диск, встроенная графика *Iris* процессор *Intel Core i5-6260U*, 16 ГБ оперативной 540. Габариты МЭ 115 × 111 × 32 мм, масса – 730 г.

Таблица / Table

### Основные технические характеристики модульного гиперспектрометра

#### The main technical characteristics of the small-scale satellite modular hyperspectrometer

Наименование Name	Значение Value	Элемент конструкции Construction element
Рабочий спектральный диапазон, мкм Operating spectral range, microns:	0,4–0,95	
Спектральное разрешение, нм Spectral resolution, nm	4,5	Полихроматор Polychromator
Расчетное пространственное разрешение с высоты 100 км, м Estimated spatial resolution from a height of 100 km, m	20	
Диаметр апертуры входного объектива, мм The diameter of the aperture of the input lens, mm	48	Входной объектив «Теле- зенитар»
Фокусное расстояние входного объектива, мм Focal length of the input lens, mm	315	Input lens « <i>Telezenitar</i> »
Полихроматор модуля оптического Polychromator of the optical module		
Дисперсия дифракционной решетки, нм/мм Dispersion of a diffraction grating, nm/mm	37,8	
Диаметр дифракционной решетки, мм Diameter of the diffraction grating, mm	70	
Относительное отверстие Relative hole	1/2,8	Дифракционная решетка Diffraction grating 523 01 040 « <i>HORIBA</i> »
Диаметр круга Роуланда, мм Diameter of the Rowland circle, mm	190	
Плотность штрихов дифракционной решетки, штр/мм The density of the lines of the Diffraction grating, lines/mm	133	
Приемная матрица Reception matrix		
Размеры активной области приемной матрицы, мм Dimensions of the active region of the receiving matrix, mm	11,05 × 11,25	
Количество эффективных пикселей приемной матрицы, шт The number of effective pixels of the receiving matrix, pcs	2040 × 2044	Матрица Matrix
Размер пикселя приемной матрицы, мкм Pixel size of the receiving matrix, μm	5,5 × 5,5	CMOSIS CMV4000
Скорость регистрации данных, кадров в секунду Data acquisition rate, fps	29	
Тип архитектуры Architecture type	Global Shutter CMOS	
Тип интерфейса Interface type	Gigabit Ethernet	Плата (обрамление) матрицы Matrix board CMOSIS CMV4000
Габариты модуля оптического, мм Optical module dimensions, mm	360 × 130 × 150	
Масса модуля оптического, г Optical module mass, g	2970	



**Рисунок 2** – Внешний вид модульного гиперспектрометра: I – модуль оптический; II – модуль электроники; III – система пространственного сканирования; 1 – камера системы видеопривязки; 2 – зеркало; 3 – кулачковый механизм

**Figure 2** – Small-scale satellite modular hyperspectrometer: I – optical module; II – electronics module; III – spatial scanning system; 1 – camera of the video reference system; 2 – mirror; 3 – cam mechanism

Система пространственного сканирования (СПС) позволяет осуществлять медленное сканирование поля зрения МО в горизонтальной плоскости. СПС включает в себя системы видеопривязки и позиционирования. Система видеопривязки состоит из объектива, матричной камеры в едином корпусе и юстировочного устройства для совмещения полей зрения системы видеопривязки и МО. Юстировочное устройство позволяет перемещать оптическую ось системы в вертикальной и горизонтальной плоскостях, добиваясь таким образом совмещения центров полей зрения системы видеопривязки и МО. Поле зрения системы видеопривязки в вертикальной плоскости больше поля зрения МО МГС. При сканировании МО в горизонтальной плоскости оператор имеет возможность наблюдать в реальном масштабе времени изображение объекта, регистрируемого МГС. Система позиционирования включает в себя плоское зеркало, двигатель с редуктором, кулачек со штангой и привод зеркала, которые закреплены на общем основании. Сканирование обеспечивается поворотом зеркала с регулировкой и подбором скорости сканирования.

### Получение гиперспектральных данных и программное обеспечение модульного гиперспектрометра

МГС построен по типу *push broom* (в каждый момент времени регистрируется узкая полоса

зондируемой поверхности. Выделение узкой полоски производится посредством входной щели). Поэтому формирование гиперспектрального изображения подстилающей поверхности происходит при перемещении летательного аппарата. Входная щель полихроматора МО МГС сканирует по пространству исследуемый объект одновременно с регистрацией спектральных изображений. Каждое полученное изображение соответствует определенной пространственной области, которая имеет форму вытянутого прямоугольника из-за наличия входной щели. Из набора фотоснимков формируется гиперкуб, за создание которого отвечает разработанное программное обеспечение (ПО). Дальнейшая обработка спектральных данных, зарегистрированных приемником излучения МО, проводится с помощью разработанного программного комплекса тематической обработки гиперспектральных данных [12]. Его функционал включает в себя широкий набор инструментов для визуализации, представления данных и проведения манипуляций с ними, а также позволяет тематическую обработку:

- атмосферная коррекция [13];
- классификация с обучением и без обучения;
- синтез и отображение цветных и псевдоцветных изображений, включая формирование изображения с заданным спектральным профилем;
- устранение шумов в данных;
- сравнение спектральных кривых между собой, установление степени их близости;
- поиск пикселей со схожими спектрами отражения с определенным доверительным интервалом (установление близости по определенной метрике спектральных кривых выбранного пикселя и остальных пикселей изображения. Результатом является построение бинарного изображения, у которого одним цветом отображаются пиксели, не удовлетворяющие установленному порогу степени близости, а другим цветом отображаются точки, спектрально схожие с исходной с заданной степенью близости).
- поиск наиболее вероятного процентного состава смеси спектров [14].

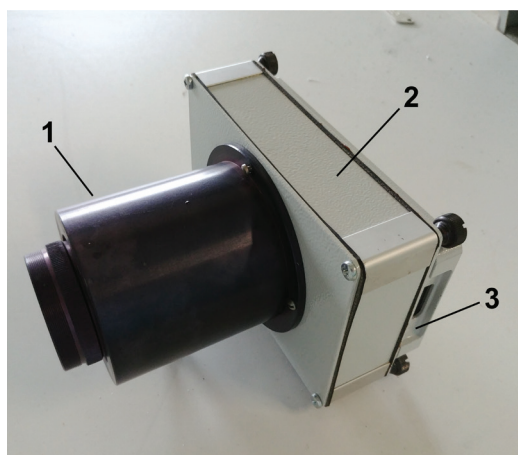
### Проверка работоспособности

С целью проверки работоспособности МГС и ПО было специально разработано техническое обеспечение, в состав которого вошли:

- контрольно-поверочная аппаратура (КПА);

- имитатор космического эксперимента (ИКЭ);
- система пространственного сканирования.

КПА изготовлена для осуществления функциональной диагностики работоспособности МГС на всех стадиях наземной обработки. Она позволяет моделировать монохроматическое излучение источников при проведении испытаний МГС с целью их отображения в поле приемной матрицы. Основными элементами КПА МГС (рисунок 3) являются смартфон, на экране которого отображается поверхность Земли, регистрируемая с борта космического носителя. Экран смартфона находится в фокальной плоскости выходного объектива с фокусным расстоянием и апертурой, аналогичными входному объективу МО МГС. Расположение экрана в фокальной плоскости обеспечивает передачу видеоизображения из бесконечности, т. е. воспроизводятся реальные условия съемки гиперспектрометром. Корпус КПА позволяет установить требуемое расстояние между экраном смартфона и выходным объективом. Бленда, в которой помещается выходной объектив, позволяет стыковаться с входным объективом МО и практически исключить ненужные боковые засветки.



**Рисунок 3** – Контрольно-поверочная аппаратура: 1 – бленда с объективом; 2 – корпус; 3 – смартфон

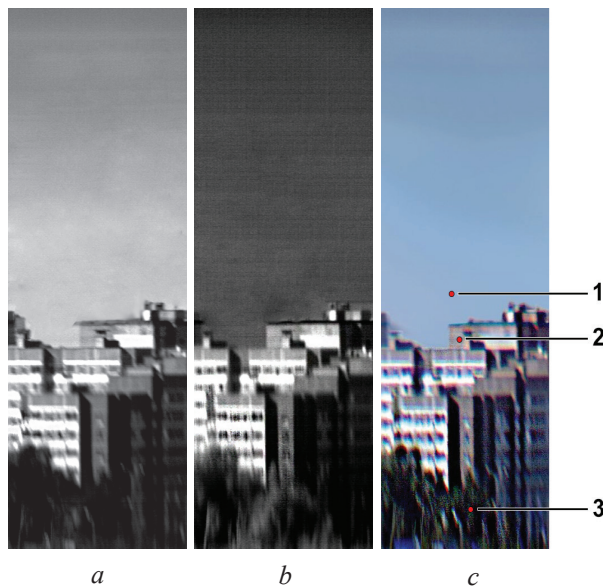
**Figure 3** – Test equipment: 1 – hood and lens inside; 2 – body; 3 – smartphone

Программное обеспечение смартфона позволяет записать и затем воспроизводить программу отображения земной поверхности, снятой с движущегося носителя. МО регистрирует гиперспектральные данные. Просмотр и оценка качества полученных данных позволяют судить о работоспособности МО МГС при различных режимах его функционирования.

ИКЭ обеспечивает имитацию движения подстилающей поверхности с разных высот и с различной скоростью для обработки параметров гиперспектральной съемки в реальных условиях космического эксперимента. Основными элементами ИКЭ МГС являются персональный компьютер, проектор, экран и ПО. С компьютера запускается программа, воспроизводящая видеоизображение поверхности Земли с движущегося носителя. Был разработан программный комплекс «Имитатор космического эксперимента». Проектор передает видеоизображение с ноутбука на экран. Изображение на экране регистрируется МГС в реальном масштабе времени. Скорость «прокрутки» изображения регулируется. Подстилающая поверхность Земли, демонстрируемая на экране, снята с различным пространственным разрешением, что дает возможность подбирать оптимальные параметры входного объектива МО МГС в зависимости от требуемого разрешения прибора. Использование нейтральных светофильтров различной плотности позволяет моделировать различные условия освещенности и оценивать параметры чувствительности и подбирать требуемые времена экспозиции МО МГС, минимизировать процент «смаза» видеоизображения.

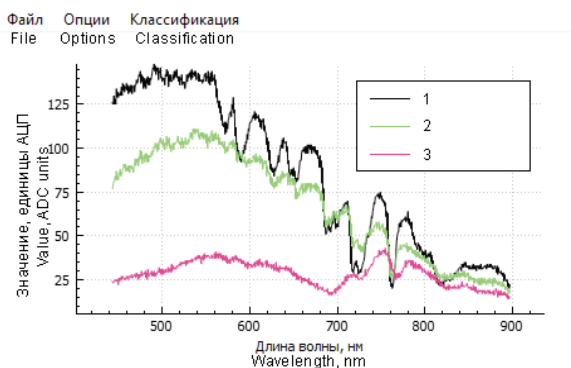
Система пространственного сканирования позволяет получить гиперкуб со стационарной точки. В лабораторных условиях было проверено функционирование трех модулей МГС. На одной оптической оси устанавливался МО и поворотное зеркало СПС так, чтобы линия визирования системы направлялась через окно на окружающие объекты (здания и растительность, удаленные на 1000 м.). Сканирование обеспечивается поворотом зеркала с регулировкой и подбором скорости сканирования. Скорость вращения поворотного зеркала варьировалась для получения гиперспектральных данных без геометрических искажений из-за наложений или пропусков изображений сканируемого объекта.

Пример гиперспектральных данных, получаемых с помощью МГС со стационарной точки, представлен на рисунках 4 и 5. Сканирование проводилось в направлении, соответствующем горизонтальной оси снимка. Изображения в отдельных каналах, а также результаты синтеза цветного изображения представлены на рисунке 4, а спектральные кривые, соответствующие разным объектам (отмечены на рисунке 4с), представлены на рисунке 5.



**Рисунок 4** – Результаты съемки из окна здания: *a* – изображение на длине волны 610 нм; *b* – изображение на длине волны 723 нм; *c* – синтезированное цветное изображение

**Figure 4** – The results of filming from the window of the building: *a* – image at a wavelength of 610 nm; *b* – image at a wavelength of 723 nm; *c* – synthesized color image



**Рисунок 5** – Измеренные спектры рассеяния неба (1) и отражения зданий (2), кроны деревьев (3) в точках, указанных на рисунке 4с

**Figure 5** – The measured scattering spectra of the sky (1) and reflectance spectra of buildings (2), crowns of trees (3) in the indicated points in Figure 4с

Цветное изображение было синтезировано на основе стандартного цветового профиля CIE 1964 [15] и передает без искажений цвета и форму наблюдаемых объектов. Представленные спектральные кривые, характеризующие три типичные поверхности, также ведут себя предсказуемо: небо (верхний спектр) самое яркое, крона деревьев – самая темная с выраженным подъемом в ближнем ИК-диапазоне.

## Заключение

Представлен маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр, предназначенный для регистрации в автономном режиме с борта спутника подстилающей поверхности Земли, и программное обеспечение, обеспечивающее регистрацию, хранение и обработку данных. Достигнуты чрезвычайно малые масса и габариты (3,7 кг, 360 × 130 × 150 мм) для такого класса устройств по сравнению с аналогами.

Анализ существующих систем и собственных разработок средств гиперспектрального дистанционного зондирования Земли показал, что параметры модульного гиперспектрометра максимально близки к характеристикам современных систем дистанционного зондирования и их оптоэлектронных компонентов. А малые габариты и модульная система позволяют устанавливать модульный гиперспектрометр на любой авиакосмический носитель.

В целях проверки работоспособности созданы контрольно-поверочная аппаратура и имитатор космического эксперимента, а также проведены тестовые съемки.

Модульный гиперспектрометр с соответствующими системами позволит решать следующие задачи:

- реализовать гиперспектральную съемку объектов, как в лабораторных условиях, так и с борта авиакосмических носителей;
- проводить предварительную обработку полученных гиперспектральных изображений;
- исследовать пространственные структуры природно-антропогенных наземных комплексов в режиме мониторинга;
- выявлять природные и техногенные источники постоянного воздействия на экологическое состояние регионов;
- проводить обработку и уточнение методов атмосферной коррекции спутниковых изображений для получения наиболее точных данных по отражательным характеристикам земной поверхности;
- выделять различия между близкими классами подстилающих поверхностей.

Сочетание методов оптической спектроскопии, координатной привязки и высокого пространственного разрешения позволит существенно повысить информативность гиперспектральных данных, поэтому создаваемая аппаратура соответствует мировому уровню для выполнения



мониторинга поверхности Земли в многочисленных спектральных каналах с малого космического аппарата.

В дальнейшем планируется проведение энергетической калибровки модульного гиперспектрометра в целях перехода от некалиброванных значений аналого-цифрового преобразователя к энергетическим величинам.

### Список использованных источников

1. Ibarrola-Ulzurrun, E. Assessment of Component Selection Strategies in Hyperspectral Imagery / E. Ibarrola-Ulzurrun, J. Marcello, C. Gonzalo-Martin // *Entropy*. – 2017. – Vol. 19, iss. 12:666. – P. 1–17.

**DOI:** 10.3390/e19120666

2. Tso, B. Classification Methods for Remotely Sensed Data / B. Tso, P.M. Mather // Taylor and Francis Inc. : New York, USA. – 2009. – 376 p.

3. Li, M. A review of remote sensing image classification technique: The role of spatio-contextual information / M. Li // *Eur. J. Remote Sens.* – 2014. – No. 47 – P. 389–411.

4. Sahoo, R.N. Hyperspectral remote sensing of agriculture / R.N. Sahoo, S.S. Ray, K.R. Manjunath // *Current Science*. – 2015. – Vol. 108, iss. 5. – P. 848–859.

5. Das, B.S. Hyperspectral remote sensing: opportunities, status and challenges for rapid soil assessment in India / B.S. Das [et al.] // *Current Science*. – 2015. – Vol. 108, iss. 5. – P. 860–868.

6. Marcello, J. Seabed Mapping in Coastal Shallow Waters Using High Resolution Multispectral and Hyperspectral Imagery / J. Marcello // *Remote Sensing* – 2018. – Vol. 10, iss. 8:1208. – P. 1–21.

**DOI:** 10.3390/rs10081208

7. Аншаков, Г.П. Использование мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования для автоматизированного мониторинга рек и водоемов в весенний период / Г.П. Аншаков, Ю.Н. Журavelь, А.В. Рашупкин // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 224–233.

**DOI:** 10.18287/0134-2452-2015-39-2-224-233

8. Родионов, И.Д. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования / И.Д. Родионов [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. – 2013. – № 6. – С. 81–93.

**DOI:** 10.7868/S0205961413060080

9. Lausch, A. Scale-specific Hyperspectral Remote Sensing Approach in Environmental Research / A. Lausch [et al.] // *Photogramm fernerkun.* – 2012. – No. 5. – P. 589–601. **DOI:** 10.1127/1432-8364/2012/0141

10. Беляев, Б.И. Фотоспектральная система для космического эксперимента «Ураган» / Б.И. Беляев [и др.] // *Космічна наука і технологія*. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 41–48.

11. Описание дифракционной решетки компании Horiba [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.horiba.com/ru/scientific/products/diffraction-gratings/catalog/flat-field>. – Дата доступа: 09.01.2019.

12. Мартинов, А.О. Программный комплекс тематической обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли / А.О. Мартинов [и др.] // *Электроника инфо*. – 2016. – № 3. – С. 55–59.

13. Katkovsky, L.V. Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data / L.V. Katkovsky [et al.] // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10, iss. 11:1698. – P. 1–18.

**DOI:** 10.3390/rs10111698

14. Heinz, D.C. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery / D.C. Heinz, Chein-I-Chang // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2001. – Vol. 39, iss. 3. – P. 529–545.

**DOI:** 10.1109/36.911111

15. Janos, S. Colorimetry: Understanding the CIE System / S. Janos // Hoboken, Wiley Interscience, 2007. – 460 p.

### References

1. Ibarrola-Ulzurrun E., Marcello J., Gonzalo-Martin C. Assessment of Component Selection Strategies in Hyperspectral Imagery. *Entropy*, 2017, vol. 19, iss. 12:666, pp. 1–17. **DOI:** 10.3390/e19120666

2. Tso B., Mather P.M. *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. New York, Taylor and Francis Inc., 2009, 376 p.

3. Li M. A review of remote sensing image classification technique: The role of spatio-contextual information. *Eur. J. Remote Sens.*, 2014, no. 47, pp. 389–411.

4. Sahoo R.N., Ray S.S., Manjunath K.R. Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current Science*, 2015, vol. 108, iss. 5, pp. 848–859.

5. Das B.S., Sarathjith M.C., Santra P., Sahoo R.N., Srivastava R., Routray A., Ray S.S. Hyperspectral remote sensing: opportunities, status and challenges for rapid soil assessment in India. *Current Science*, 2015, vol. 108, iss. 5, pp. 860–868.

6. Marcello J. Seabed Mapping in Coastal Shallow Waters Using High Resolution Multispectral and Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 8:1208, pp. 1–21. **DOI:** 10.3390/rs10081208

7. Anshakov G.P., Zhuravel Yu.N., Raschupkin A.V. [The use of multi- and hyperspectral remote sensing data for automated monitoring of rivers and reservoirs in the spring]. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2015, vol. 39, no. 2, pp. 224–233 (in Russian).

**DOI:** 10.18287/0134-2452-2015-39-2-224-233

8. Rodionov I.D., Rodionov A.I., Vedeshin L.A., Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P. [Aviation hyperspectral complexes for solving problems of remote

sensing]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Exploration from Space], 2013, no. 6, pp. 81–93 (in Russian).

**DOI:** 10.7868/S0205961413060080

9. Lausch A., Pause M., Merbach I., Gwilym-Margianto S., Schulz K., Zacharias S., Seppelt R. Scale-specific Hyperspectral Remote Sensing Approach in Environmental Research. *Photogramm fernerkun*, 2012, no. 5, pp. 589–601. **DOI:** 10.1127/1432-8364/2012/0141

10. Belyaev B.I., Belyaev Yu.V., Domaratsky A.V., Katkovsky L.V., Mole Yu.A., Rogovets A.V., Khvalley S.V. [Photo-spectral system for the Uragan space experiment]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya* [Cosmic science and technology], 2010, vol. 16, no. 2, pp. 41–48 (in Russian).

11. *Opisaniye difraktsionnoy reshetki kompanii Horiba* [Description of the diffraction grating company Horiba]. Available at: <http://www.horiba.com/ru/scientific/products/diffraction-gratings/catalog/flat-field> (accessed 01.08.2019).

12. Martinov A.O., Shiryaeva A.D., Ivanov V.A., Ivanov D.A., Pasenyuk A.A., Katkovsky L.V. [Program complex for the thematic processing of the hyperspectral data of remote sensing of the Earth]. *EHlektronika info* [Electronics info], 2016, no. 3, pp. 55–59 (in Russian).

13. Katkovsky L.V., Martinov A.O., Siliuk V.A., Ivanov D.A., Kokhanovsky A.A. Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 11:1698, pp. 1–18.

**DOI:** 10.3390/rs10111698

14. Heinz D.C., Chein-I-Chang. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, vol. 39, iss. 3, pp. 529–545.

**DOI:** 10.1109/36.911111

15. Janos S. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Hoboken, Wiley Interscience, 2007, 460 p.