

**БАЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ
ПО ДАННЫМ ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С БОРТА МКС****Л. В. Катковский**

УДК 528.8

*НИИ прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
220045, Минск, Беларусь; e-mail: remsens@mail.ru*

(Поступила 17 сентября 2019)

Представлены некоторые результаты съемок и обработки изображений и спектров, зарегистрированных спектрометрической научной аппаратурой с борта МКС в рамках космического эксперимента “Ураган”. Описаны созданная по результатам многолетних измерений с борта МКС с помощью фотоспектральной системы база коэффициентов спектральных яркостей природных объектов и ее использование с соответствующими примерами для поиска различных подстилающих поверхностей на мультиспектральных и гиперспектральных изображениях дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: полетные калибровки, подспутниковый полигон, фотоспектральная аппаратура, коэффициент спектральной яркости.

This paper presents some results of the measurements and processing of spectra and images by the spectrometric scientific equipment from the ISS in the frame of the Uragan space experiment. As a result of many years of measurements, we describe the database of the surface reflectance of natural objects. Examples of using the database for searching various underlying surfaces on multispectral and hyperspectral satellite images are given.

Keywords: flight calibrations, test site, photospectral equipment, spectral brightness.

Введение. В рамках эксперимента “Ураган” на МКС работает научная аппаратура: с 2010 г. — фотоспектральная система (ФСС) [1], с 2014 г. — видеоспектральная система (ВСС) [2]. Привлечение космонавтов к решению задач мониторинга земной поверхности показало ряд преимуществ съемок с участием оператора по изучению потенциально опасных и катастрофических явлений по сравнению со спутниковой съемкой. С использованием указанных приборов проведено большое количество сеансов съемки различных объектов на земной поверхности. По информативности ФСС и ВСС занимают промежуточное положение между мультиспектральными и гиперспектральными системами, поскольку регистрируют изображения в трех широких каналах и спектры отдельных пространственных зон на каждом изображении. ФСС оборудована спектральным модулем и модулем регистрации изображения. Данные представляют собой спектры высокого разрешения (три спектра разных зон кадра на одно изображение), а данные модуля регистрации изображения ФСС — RGB-изображения. У ВСС на одно изображение приходится более 256 спектров различных пространственных зон кадра.

Разработанное специальное программное обеспечение (ПО) для обработки спектральных данных ФСС и ВСС учитывает специфический состав и форматы данных ФСС и ВСС и включает в себя методы предварительной обработки, предназначенные для улучшения качества данных, оригинальные методы атмосферной коррекции [3—5] и ряд методов спектральной классификации.

**SURFACE REFLECTANCE DATABASE BY PHOTOSPECTRAL SYSTEM MEASUREMENTS
FROM THE INTERNATIONAL SPACE STATION**

L. V. Katkovsky (*A. N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University, Minsk, 220045, Belarus; e-mail: remsens@mail.ru*)

Для обработки спектров и трехканальных изображений, получаемых ФСС и ВСС с борта МКС, предварительно проводится радиометрическая коррекция спектров (по лабораторным калибровочным коэффициентам), затем радиометрическая коррекция изображений с использованием откалиброванных спектров и уточненной пространственной “привязки” областей спектрометрирования к изображениям [4, 5]. Предварительная обработка изображений включает в себя также устранение виньетирования снимков с помощью сглаженной матрицы коэффициентов виньетирования, полученной при лабораторных съемках камерой протяженного однородного источника — фотометрического шара [6]. Последующее проведение атмосферной коррекции обеспечивает получение коэффициентов спектральных яркостей (КСЯ) или спектральных альбедо поверхности, что позволяет обнаруживать в сцене объекты с заданными спектральными сигнатурами (путем проведения согласованной фильтрации), а также выполнять более точную классификацию подстилающих поверхностей, используя для этой цели в том числе спектры отражения различных материалов из имеющихся спектральных библиотек.

Поскольку область спектрометрирования каждой из систем (проекция входной щели спектрометра на поверхность Земли) достаточно протяженная (у ФСС она содержит несколько тысяч пикселей изображения, у ВСС — несколько сотен пикселей), важными функциями, реализованными в разработанном ПО, являются декомпозиция спектров, т. е. нахождение спектрального состава смешанных спектров (представление измеренных спектров в виде линейной суперпозиции спектров “чистых” или однородных типов подстилающей поверхности), а также поиск схожих спектров в спектральной библиотеке (находится количественная мера подобия двух спектров (обычно в процентах), которая может отличаться для разных метрик (расстояний) в спектральном пространстве).

База спектральных характеристик отражения по данным ФСС для целевого поиска объектов на космических изображениях. За время функционирования на борту МКС системой ФСС зарегистрированы изображения и спектры большого количества разнообразных подстилающих поверхностей Земли. Эти данные обладают высоким спектральным разрешением, а RGB-изображения и географическая привязка обеспечивают определение типа поверхностей, которым соответствуют зарегистрированные спектры. Созданные методики обработки данных ФСС, в том числе атмосферная коррекция, позволили сформировать библиотеку КСЯ большого количества подстилающих поверхностей, часто не доступных для наземных измерений, которая может использоваться для подготовки исходных данных для проведения космических экспериментов по дистанционному зондированию и поиску целевых объектов.

При создании базы КСЯ по измерениям ФСС проведена валидация некоторой части спектров ФСС по наземным измерениям, полученным в проекте RadCalNet, являющемся инициативой рабочей группы по калибровке и валидации Комитета по спутниковым наблюдениям Земли [7]. Один из четырех исследовательских полигонов сети RadCalNet расположен в пустыне около населенного пункта Гобабэб (Намибия) и имеет кодовое название GONA. Данный полигон выбран для проведения валидации с данными ФСС, так как имеется большое количество спектров разных пустынь, снятых ФСС. Для валидации отобран ряд спектров спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) песка, зарегистрированных ФСС 21.06.2011, 30.08.2011 и 30.03.2012. По спектрам СПЭЯ рассчитаны КСЯ по разработанной методике и ПО атмосферной коррекции. Для валидации данных ФСС по RadCalNet взяты несколько измерений с полигона GONA, разнесенных по времени. КСЯ, рассчитанные по данным ФСС, а также измеренные на полигоне GONA, показаны на рис. 1. Видно хорошее соответствие КСЯ, полученных по данным ФСС и измеренных на полигоне GONA в разное время.

Усредненный коэффициент детерминации $\langle R^2 \rangle$ для трех измерений ФСС и одного спектра песка GONA от 19.09.2017 составил 0.816, от 28.03.2018 $\langle R^2 \rangle = 0.863$. Это свидетельствует о достоверности КСЯ, рассчитанных по данным ФСС, длительной стабильности спектров отражения песка и возможности использования созданной по данным космической съемки базы КСЯ различных поверхностей.

Принимая во внимание тот факт, что при измерениях с помощью ФСС спектрометрируемая область может иметь размеры в одном направлении до нескольких километров, для создания базы КСЯ отобраны данные по относительно однородным поверхностям. По многолетним измерениям системой ФСС в базу данных отобрано ~100 спектров различных объектов, которые разделены на шесть групп по типам подстилающих поверхностей: песчаные поверхности, растительность и травяные поля, горные поверхности, водные поверхности, снежные и ледяные поверхности, смешанные типы поверхностей.

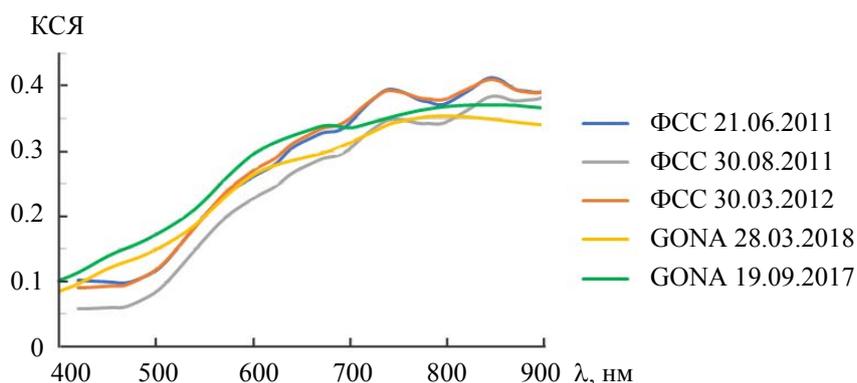


Рис. 1. КСЯ, рассчитанные по данным ФСС и измеренные на полигоне GONA

Пользуясь библиотекой КСЯ по данным ФСС, можно готовить исходные данные для космических экспериментов, осуществлять валидацию наземных и спутниковых измерений, тестировать методики атмосферной коррекции и тематической обработки спутниковых данных, проводить кросс-калибровку различных сенсоров, мониторинг состояния подстилающих поверхностей. Одним из применений созданной библиотеки может быть поиск определенных целевых поверхностей по изображениям дистанционного зондирования Земли. Используемые спектры ФСС высокого разрешения при этом преобразовываются (как правило, автоматически) в спектры с числом точек, равным числу каналов обрабатываемого мультиспектрального или гиперспектрального изображения. Дополнительно для отсеивания заведомо ненужных результатов могут быть выбраны нецелевые спектры.

Пример решения указанной задачи (поиск целевых спектров по спектрам ФСС) реализован с использованием изображений гиперспектрального сенсора Hyperspec (миссия Earth Observing-1, частью которой являлся этот сенсор, завершилась в марте 2017 г.), имеющего 242 узких спектральных канала в диапазоне 400—2500 нм. Далее показаны результаты для двух изображений Hyperspec, одно из которых (от 25.06.2011) покрывает частично пустыню Сахару на территории Туниса (фрагмент изображения Hyperspec, рис. 2, *а*), второе — территорию Красного моря и побережья (рис. 2, *в*). Результаты поиска песка и воды по спектрам из библиотеки КСЯ (по данным ФСС) методом спектрального угла выделены на рис. 2, *б* и *г*. Можно отметить достаточно четкое выделение песка на изображении и отделение его от других типов поверхности, а также безошибочное детектирование водной поверхности, где видно отделение прибрежной воды, которая не отнесена к искомому классу воды открытого моря.

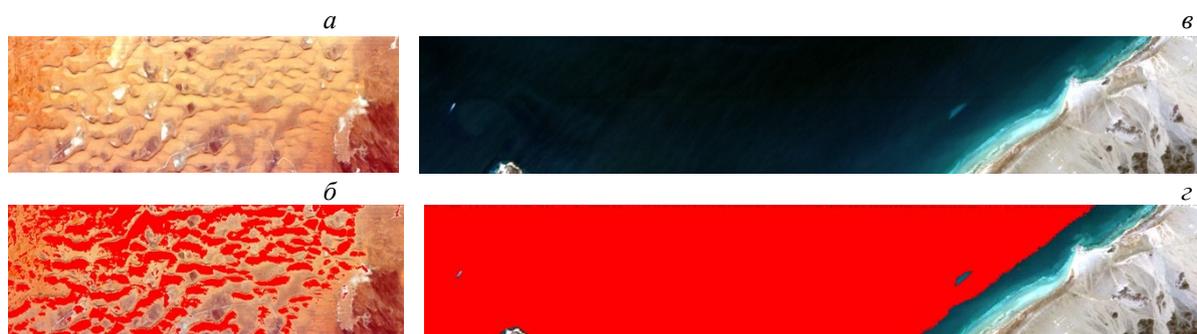


Рис. 2. Фрагмент изображения Hyperspec после проведенной атмосферной коррекции (*а*); результат поиска песка по спектру КСЯ по данным ФСС (*б*); изображение Hyperspec после атмосферной коррекции (*в*); результат поиска спектра КСЯ воды из библиотеки КСЯ по данным ФСС (*г*)

Далее показана целесообразность создания баз спектральных данных отражательных характеристик природных и искусственных объектов на основе спутниковых и других натуральных измерений. Сравнение КСЯ, рассчитанных по данным ФСС, с новыми КСЯ, полученными современными спутниковыми системами по аналогичным объектам, показывает актуальность космических спектров

ФСС даже через несколько лет после их получения. Для сравнения в качестве примеров выбраны изображения аппарата Landsat 8 2019 г., на которых присутствуют зеленая растительность и горная поверхность. Из базы КСЯ по данным ФСС выбраны изображения и спектры, соответствующие этим двум типам объектов (рис. 3).

Спектр ФСС сворачивался с функциями спектральной чувствительности четырех каналов Landsat 8 (blue, green, red, NIR) [8], лежащих в диапазоне спектра ФСС, и полученные КСЯ сравнивались с усредненными значениями по однородной группе пикселей изображения Landsat 8 соответствующей территории (рис. 4, табл. 1). Приведены ошибки Δ , рассчитанные по формуле $\Delta = (1 - B_{\text{ФСС}}/V_{\text{ФСС}})100\%$, где $B_{\text{ФСС}}$ и $V_{\text{ФСС}}$ — КСЯ, рассчитанные по данным ФСС и Landsat 8.

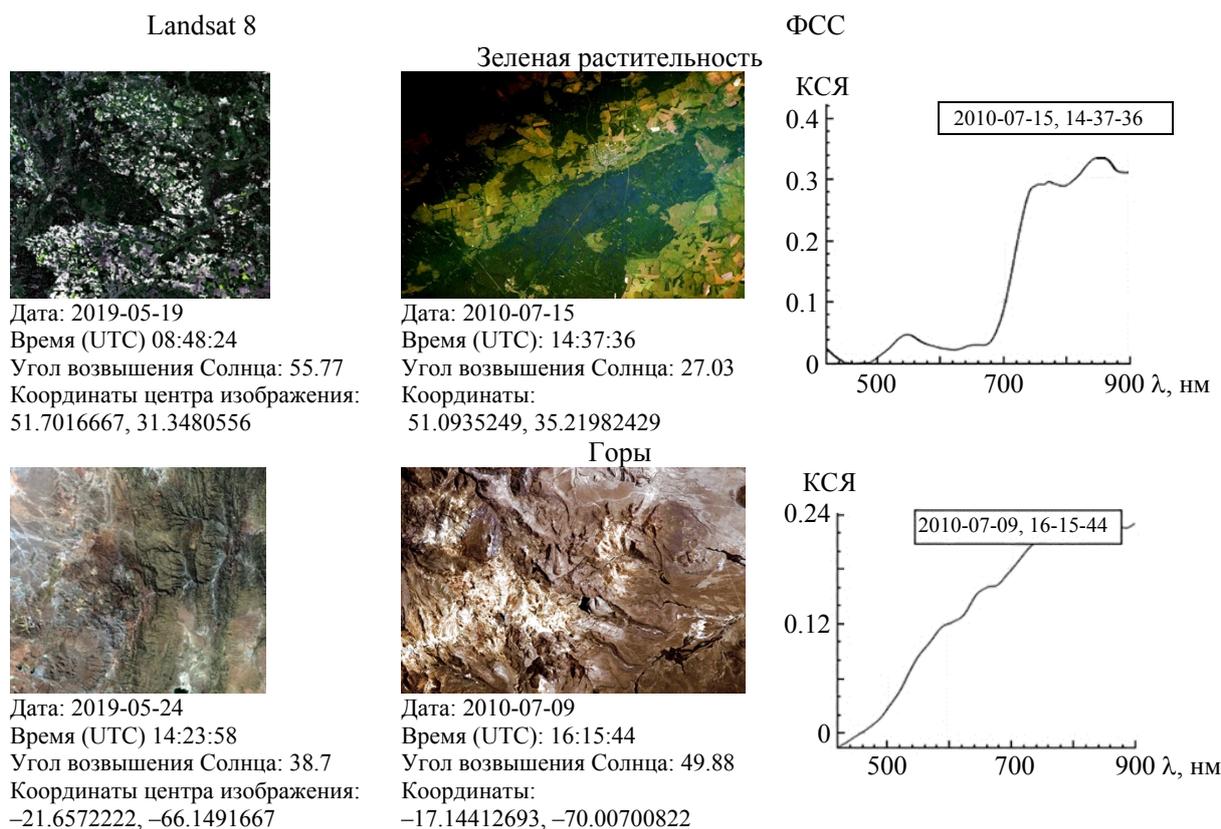


Рис. 3. Участки изображения Landsat 8, а также изображения и спектры ФСС

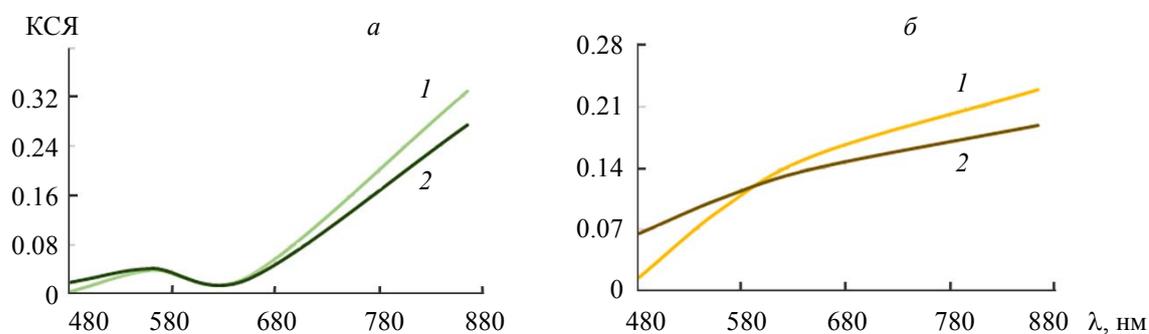


Рис. 4. Результаты сравнений КСЯ по данным ФСС (1) и Landsat 8 (2), а — зеленая растительность, б — горы

Т а б л и ц а 1. Результаты сравнений КСЯ по данным ФСС и Landsat 8

Тип поверхности	Δ , %			
	Blue	Green	Red	NIR
Растительность	76.82	6.5	-16.7	-20.44
Горы	77.56	12.08	-11.04	-21.8

Заключение. Показано, что база коэффициентов спектральной яркости, созданная на основе ретроспективных данных космической съемки, полученных в рамках космического эксперимента “Ураган” на МКС, содержит актуальную спектральную информацию, полезную для калибровок космических сенсоров, валидации измерений, тестирования методик решения задач классификации объектов земной поверхности.

- [1] Б. И. Беляев, М. Ю. Беляев, Л. В. Десинов, А. В. Роговец, В. В. Рязанцев, Э. Э. Сармин, В. А. Сосенко. Косм. техн. технол., № 1 (2014) 22—28
- [2] Б. И. Беляев, М. Ю. Беляев, Э. Э. Сармин, В. Ф. Гусев, Л. В. Десинов, В. А. Иванов, Ю. А. Крот, А. О. Мартинов, В. В. Рязанцев, В. А. Сосенко. Косм. техн. технол., № 2 (2016) 12—20
- [3] L. V. Katkovsky, A. O. Martinov, V. A. Siliuk, D. A. Ivanov, A. A. Kokhanovsky. Remot. Sens., 10 N 11 (2018) 1698
- [4] М. Ю. Беляев, Б. И. Беляев, Д. А. Иванов, Л. В. Катковский, А. О. Мартинов, В. В. Рязанцев, Э. Э. Сармин, О. О. Силюк, В. Г. Шукайло. Современ. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса, 15, № 6 (2018) 213—222
- [5] М. Ю. Беляев, Б. И. Беляев, Д. А. Иванов, Л. В. Катковский, А. О. Мартинов, В. В. Рязанцев, Э. Э. Сармин, О. О. Силюк, В. Г. Шукайло. Современ. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса, 15, № 6 (2018) 223—234
- [6] И. М. Цикман, Ю. В. Беляев, А. П. Попков. Материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф. “Приборостроение 2014”, Минск (2014) 227—228
- [7] Radiometric Calibration Network portal; <https://www.radcalnet.org/#/> (дата обращения 13.06.2019 г.)
- [8] Spectral Response of the Operational Land Imager In-Band, Band-Average Relative Spectral Response; <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 13.06.2019 г.)