

## Некоторые результаты летных испытаний фотоспектральной системы ФСС

М.Ю. Беляев<sup>1</sup>, Б.И. Беляев<sup>2</sup>, Л.В. Катковский<sup>2</sup>, Ю.А. Крот<sup>2</sup>,  
А.В. Роговец<sup>2</sup>, Э.Э. Сармин<sup>1</sup>, С.В. Хвалец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО РКК «Энергия», ул. Ленина, 4-а, 141070, г. Королев, Московской обл.,  
Российская федерация, тел. (+7-495) 513-84-09, E-mail: Mikhail.Belyaev@rsce.ru

<sup>2</sup>НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белгосуниверситета,  
ул. Курчатова, 7, 220108, Минск, Беларусь; тел.: (+375-17)278-04-09,  
E-mail: remsens@niks.by

Представлены первые результаты летных испытаний фотоспектральной системы на борту МКС и во время авиационных съемок на самолете АН-2. Описано разработанное программное обеспечение обработки спектров и изображений, построенное по модульному принципу. Проведено уточнение калибровочных данных летного образца ФСС, проанализирована и подтверждена стабильность спектрально-энергетических характеристик системы, определенных в результате предполетных калибровок. Проанализированы регистрируемые ФСС спектры и показано, что получаемые данные позволят проводить более детальный спектральный анализ объектов подстилающих поверхностей.

**Ключевые слова:** космическая съемка, изображение, спектр, пространственная привязка, спектрально-энергетическая калибровка, СПЭЯ, предварительная обработка, атмосферная коррекция.

### Введение

В Научно-исследовательском институте прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского Государственного Университета по заказу Института географии Российской академии наук и РКК «Энергия» им. С.П. Королева разработана и изготовлена фотоспектральная система (ФСС) (Беляев Б.И., Беляев Ю.В. и др. 2010; Беляев, Домарацкий и др. 2010; Крот и др., 2010), предназначенная для проведения измерений спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм (модуль спектро-радиометра, МС) и фотоизображений высокого пространственного разрешения в видимом диапазоне длин волн (модуль регистрации изображений, МРИ) с борта Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) в космическом эксперименте «Ураган» (экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф) (Беляев, Рязанцев и др., 2009).

ФСС была доставлена на борт РС МКС 4 июля 2010 года. В июле 2010 года были проведены летные испытания ФСС на борту МКС и одновременные испытания аналогичного образца (ЗИП) на борту самолета-зондировщика АН-2 над территорией Беларуси разработчиком системы. За полгода эксплуатации прибора на МКС было проведено порядка 20 сеансов съемок, снято более 1500 спектров высокого разрешения и 500 соответствующих им изображений. К настоящему времени большая часть данных передана на Землю и ведется анализ первых результатов съемок.

Целью обработки данных ФСС является:

- повышение достоверности обнаружения и повышение точности классификации различных объектов из космоса на основе совместной обработки спектров и изображений;

- формирование базы данных спектральных сигнатур объектов подстилающих поверхностей и явлений для последующего использования при обработке космической информации.

### Программное обеспечение обработки данных

В настоящее время для обработки данных ФСС разработано несколько программных модулей.

Модуль просмотра **PhSS\_Viewer**, используя таблицы калибровочных данных, осуществляет пересчет исходных спектров («на лету») в единицы спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), позволяет просматривать изображения и сопутствующие спектры (как исходные в отсчетах АЦП, так и в единицах СПЭЯ) и отображает служебную информацию о каждом пакете данных.

**PhSS\_Spectr** – это модуль отдельной обработки спектральных данных.

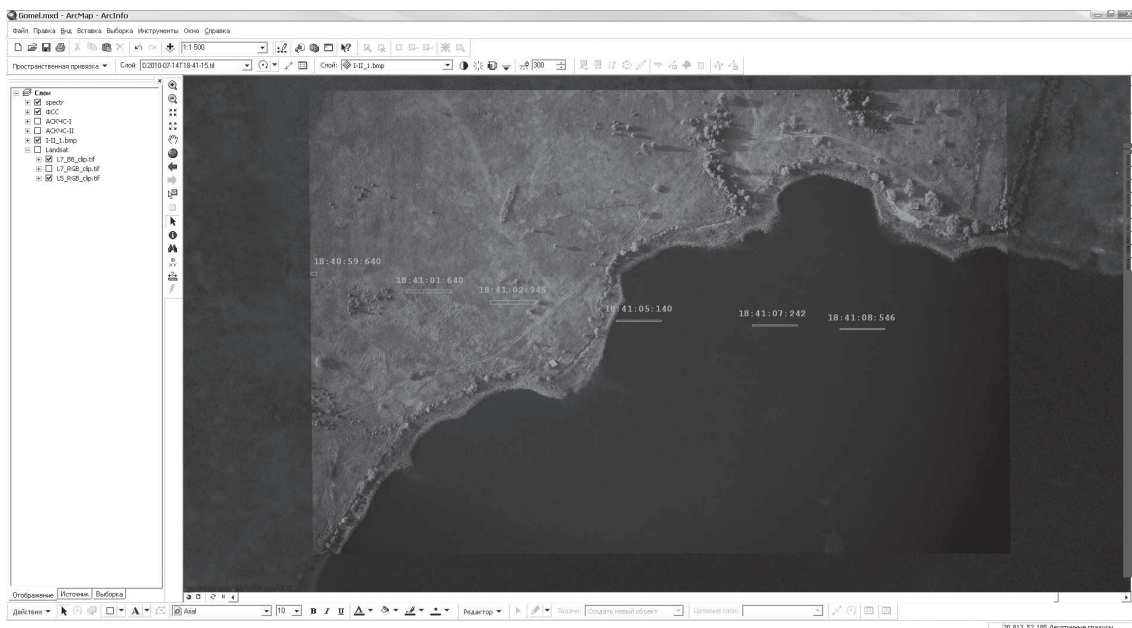
Подпрограмма позволяет загружать наборы спектров, отображать любое их количество в заданном формате (длина волны / СПЭЯ, длина волны / отсчеты АЦП) и выполнять ряд математических операций:

- Сглаживание спектров с применением релаксационного фильтра
- Экспорт спектров в формат таблиц Excel для последующей обработки;
- Сохранение графиков спектров в виде изображений стандартных форматов;
- Вычисление интегралов по длинам волн от спектра с заданной весовой функцией (свертка), удобно при учете аппаратной функции (спектральной чувствительности) регистрирующего прибора.
- Нормализация спектров на интегральную яркость – деление спектра на интеграл от него же по всему спектральному диапазону

**PhSS\_Pro** – это модуль осуществляет основную оригинальную совместную обработку изображений и привязанных к ним спектров. В режиме трассовой съемки на каждое изображение приходится три спектра, соответствующих трем областям спектрометрирования, расположенным примерно на линии движения от центра кадра по направлению полета. В результате работы этого модуля будут рассчитываться (восстанавливаться) спектры, соответствующие отдельным типам подстилающих покрытий в пределах кадра изображения.

Важная задача, которая решается модулем PhSS\_Pro на этапе предварительной обработки – это пространственная привязка по времени съемки спектрометрируемых областей (в виде сильно вытянутого прямоугольника – проекции входной щели полихроматора МС ФСС) к соответствующим изображениям. Эта операция необходима как для визуально-интерактивного анализа изображений и спектров, так и в качестве подготовки данных для последующей процедуры совместной обработки спектров и изображений.

При привязке используются данные о геометрии съемки, фокусном расстоянии объекта МРИ ФСС, данные о полях зрения МРИ ФСС и МС ФСС, высоте съемки, скорости движения носителя, все временные характеристики сеанса съемки из служебного файла, а также данные об углах ориентации оптических осей (поступающие с датчиков углов поворота на установочном кронштейне ФСС). Кроме как в модуле PhSS\_Pro привязка может выполняться с использованием ряда стандартных пакетов ПО, например, ArcMap (рис. 1).



*Рис. 1. Пространственная привязка областей спектрометрирования МС (отрезки прямых) к изображению МРИ ФСС в ArcMap*

Еще одна задача, которая решается в программном модуле PhSS Pro – «сшивка» последовательных изображений, т.е. построение трассовой мозаики. В качестве первого приближения мозаика строится по известным координатам станции и углам положения оптической оси ФСС. Мозаика корректируется интерактивно с использованием идентифицированных опорных точек в перекрывающихся областях кадров.

Основная задача модуля PhSS\_Pro – это вычисление спектров для каждого отдельного пикселя изображения, находящегося в пределах входной щели полихроматора спектрометра, с последующей интерполяцией (вычислением) спектров для всех остальных пикселей изображения. Вместо отдельных пикселей при решении этой задачи могут рассматриваться отдельные классы подстилающей поверхности (множества пикселей с близкими спектрами), что значительно сократит объем вычислений.

### **Анализ стабильности наземных калибровок**

Предполетная калибровка по длинам волн модуля спектрометра (МС) ФСС осуществлялась с помощью традиционной методики путем сканирования по спектру от 350 до 1050 нм выходного излучения монохроматического осветителя метрологического комплекса «Камелия-М» (Роговец и др., 2010). Было определено спектральное разрешение МС, которое составило 2 нм. Для дискретных опорных длин волн находились значения номеров каналов линейного ПЗС-приемника. Зависимость длины волны от номера канала была исследована на линейность. Однако оказалось, что на концах ПЗС-линейки отклонение от линейности составляет порядка 4 нм, что составляет недопустимую погрешность при спектральном разрешении порядка 2 нм. Поэтому в результате калибровки по длинам волн по полученным точкам (опорная длина волны – номер канала) строился интерполяционный кубический сплайн, позволяющий определять длину волны для любого номера канала линейки с высокой точностью.

При предполетных энергетических калибровках абсолютная спектральная чувствительность МС определялась по диффузному излучателю (фотометрическая сфера) метрологического комплекса «Камелия-М», откалиброванному по СПЭЯ. Для каждого спектрального канала (длины волны) и различных времен экспозиции МС установлены линейные зависимости между значениями сигнала МС в отсчётах АЦП и СПЭЯ диффузного излучателя. Определены пороговые значения СПЭЯ при соотношении сигнал/шум = 3/1. Также проведена калибровка модуля регистрации изображения (МРИ) ФСС, которая включала определение относительной спектральной чувствительности R, G, B каналов приемной матрицы фотокамеры с использованием монохроматического осветителя метрологического комплекса «Камелия-М».

В ходе анализа проверялись следующие характеристики прибора, находящегося на МКС:

- калибровка по длинам волн;
- взаимная ориентация полей зрения МС и МРИ.

При проведении как авиационных, так и космических спектрометрических измерений могут иметь место сдвиги калибровок по длинам волн и по энергетике, т.е. калибровочные коэффициенты, полученные при лабораторных калибровках, нуждаются в определенной коррекции при обработке данных авиакосмической съемки. Сдвиги в положении каналов спектрометра МС по шкале длин волн и изменения спектрального разрешения могут иметь место по причине вибраций (в частности, во время доставки прибора на МКС, а также во время эксплуатации на борту), изменений температуры и давления внутри прибора. Такая ситуация присуща всем спектральным приборам, эксплуатируемым на борту носителей. При обработке этих спектральных данных используются соответствующие методы коррекции (Во-Сай Гао и др.).

При анализе спектров, зарегистрированных МС ФСС с борта самолета, установлено, что все известные линии (полосы) поглощения, наблюдаемые в спектрах, зарегистрированных с борта МКС, лежат в целом в соответствующих диапазонах, отвечающих их истинному положению, спектральному разрешению и погрешностям калибровок МС. В частности, это относится к полосе поглощения молекулярного кислорода с центром 762 нм, полосам поглощения воды 720, 820, 940 нм и др. (рис. 2).

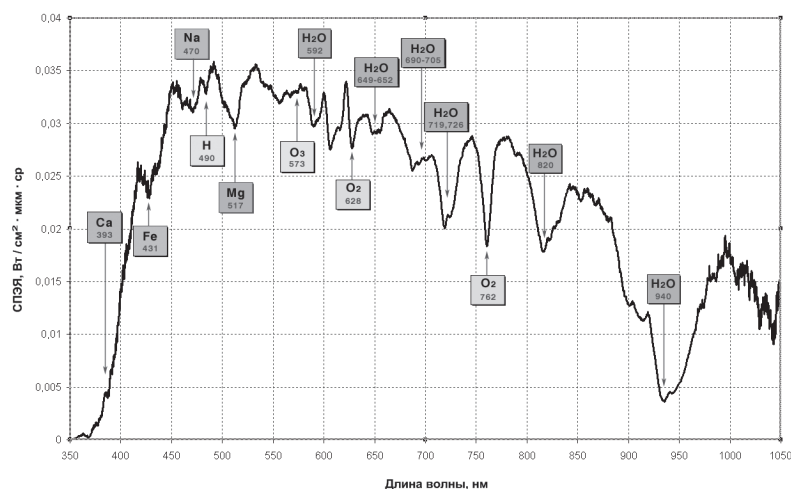


Рис. 2. Спектр отражения песчаной поверхности, зарегистрированный МС ФСС, с обозначенными фраунгоферовыми линиями и полосами поглощения излучения атмосферными газами

Для проверки калибровки по длинам летного образца прибора, находящегося на борту МКС, также был проведен анализ положения в спектрах, зарегистрированных из космоса, фраунгоферовых линий, а также полосы поглощения атмосферного кислорода с центром на 762 нм. Форма последней была аппроксимирована полиномом 4-ой степени для нахождения аналитическим способом центра полосы (минимума кривой). Среднеквадратическое отклонение полученных номеров каналов, соответствующих минимуму в области 762 нм, составило 4 канала (меньше 1 нм). Общий интервал значений составил 20 каналов, (порядка 2 нм). Полученные смещения по длинам волн иллюстрирует рис. 3.

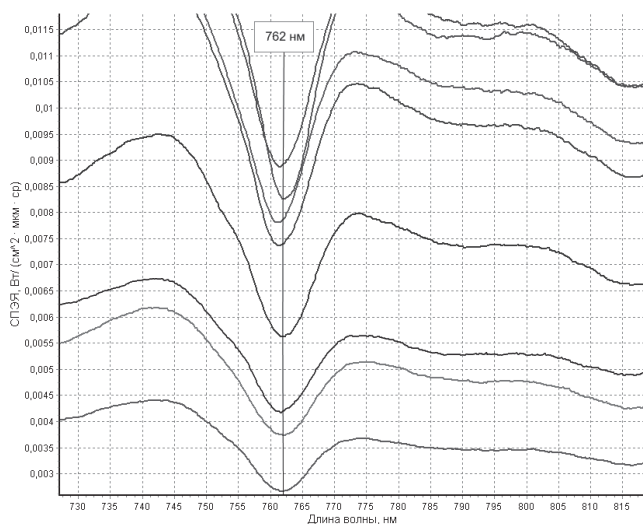


Рис. 3. Фрагменты спектров в области полосы поглощения кислорода 762 нм, зарегистрированные МС ФСС в различных сеансах съемки из космоса

При съемках с борта МКС ФСС закрепляется на кронштейне иллюминатора, и информация с датчиков углов поворота оптических осей записывается в момент регистрации каждого спектра и изображения. Таким образом, можно однозначно определить пространственную привязку спектрометрируемых участков к соответствующим изображениям. По полученным данным был проведен анализ взаимной ориентации полей зрения МС и МРИ и установлено, что ориентация не изменилась после доставки прибора на борт МКС и во время эксплуатации.

С помощью полученных данных был определен диапазон возможных значений СПЭЯ при измерениях с борта МКС. Было установлено, что спектр подстилающих поверхностей, обладающих высокой отражательной способностью (снег, пески), невозможно зарегистрировать с помощью МС, когда зенитный угол Солнца наибольший. Это связано с тем, что СПЭЯ в данном случае составляет порядка  $10^{-1}$  Вт/(см<sup>2</sup>·мкм·ср) на длине волны 500 нм, в то время как верхняя граница рабочего диапазона СПЭЯ при минимальной экспозиции МС (12 мс) составляет  $2 \cdot 10^{-2}$  Вт/(см<sup>2</sup>·мкм·ср) на длине волны 500 нм. В то же время, подстилающие поверхности, обладающие низкой отражательной способностью, лучше регистрировать в условиях максимального зенитного угла Солнца. Нижняя граница диапазона регистрируемых МС яркостей составляет  $3,3 \cdot 10^{-5}$  Вт/(см<sup>2</sup>·мкм·ср) на длине волны 500 нм.

Проведены теоретические оценки возможного диапазона значений СПЭЯ отраженного излучения на верхней границе атмосферы от различных объектов для сопоставления с данными измерений МС ФСС.

Для приближенной оценки яркости регистрируемого излучения  $L_\lambda$  через спектральную освещенность  $E_\lambda$  поверхности может быть использована формула:  $L_\lambda = \rho_\lambda E_\lambda T_\lambda / \pi$ , где  $\rho_\lambda$  коэффициент отражения (спектральной яркости) подстилающей поверхности,  $T_\lambda$  – спектральное пропускание атмосферы. Освещенность поверхности Земли в спектральном интервале 0,4–0,9 мкм лежит в диапазоне 0,10 – 0,15 Вт/(см<sup>2</sup>•мкм) (безоблачная атмосфера, Солнце в зените), пропускание атмосферы в этой же области спектра равно примерно 0,6 – 0,9 (вне полос поглощения атмосферных газов и без учета дополнительного вклада атмосферной дымки за счет рассеяния вверх в голубой части спектра). Диапазон изменения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ)  $\rho_\lambda$  достаточно широкий и сильно зависит как от поверхности, так и от спектрального диапазона (рис. 4).

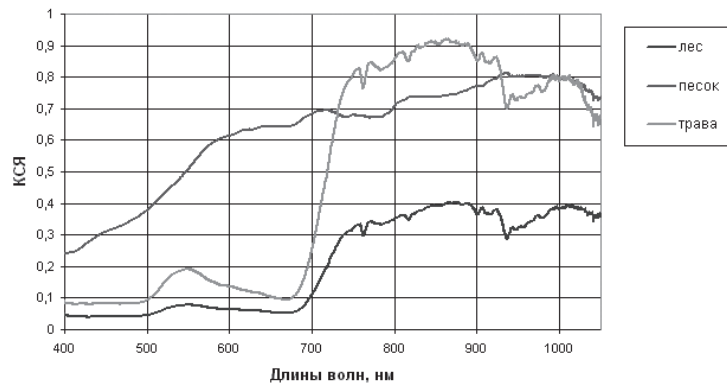


Рис. 4. Коэффициенты спектральной яркости различных поверхностей (наземные измерения МС ФСС)

С учетом приведенных данных значения СПЭЯ растительно-почвенных объектов, зарегистрированные из космоса, в спектральном диапазоне 0,6 – 0,7 мкм должны лежать в интервале  $(1,5 \div 3) \cdot 10^{-3}$  Вт/(см<sup>2</sup>•ср•мкм), и в интервале  $(4,5 \div 7) \cdot 10^{-3}$  Вт/(см<sup>2</sup>•ср•мкм) для диапазона 0,75 – 0,9 мкм что подтверждается рис. 5 и 6, где приведены изображение (рис. 5) и соответствующие ему спектры (рис. 6) растительных подстилающих поверхностей, зарегистрированные ФСС с борта МКС. Максимум в спектрах в голубой области 400-450 нм обусловлен вкладом атмосферной дымки в результате рэлеевского рассеяния (спектры приведены без атмосферной коррекции). Полученные значения также согласуются с данными других измерений из космоса (Шовенгердт, 2010).

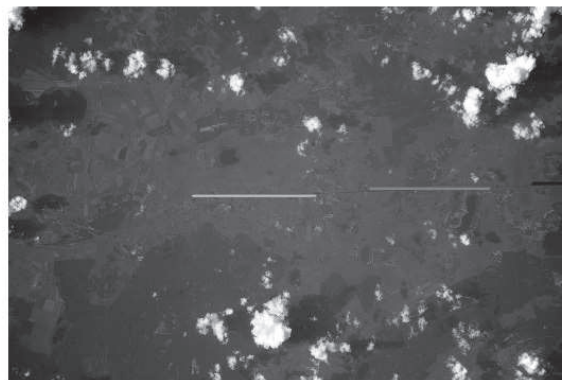


Рис. 5. Изображение земной поверхности, полученное с борта МКС (отрезками на изображении показаны положения входной щели МС)

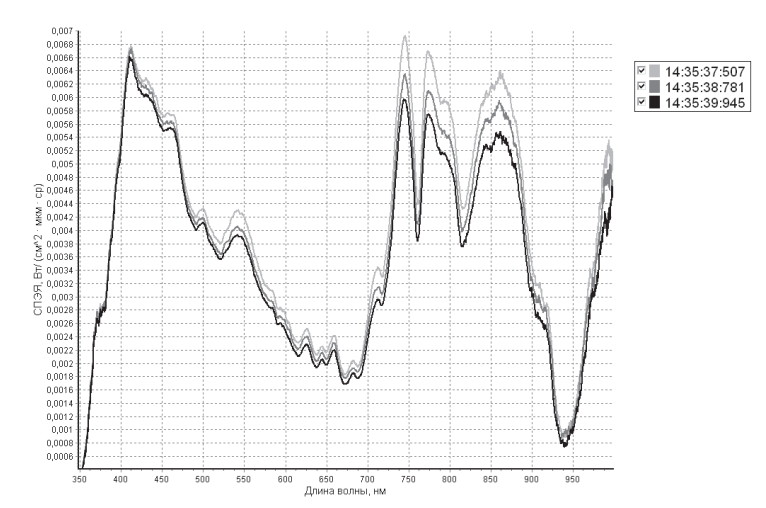


Рис. 6. Спектры подстилающей поверхности, соответствующие изображению на рис. 5

### Некоторые результаты съемок

Кроме проверки работоспособности прибора был проведен и непосредственный анализ спектральных данных. В отличие от наземных и авиационных (с небольших высот, до 1000 м) измерений значения СПЭЯ полученных из космоса спектров в области 350–530 нм (или даже 400–700 нм) всегда значительно выше. При анализе данных космических съемок обнаружено также, что во всех измерениях максимум спектра уходящей радиации смещен в коротковолновую область относительно максимума излучения в солнечном спектре, величина этого смещения зависит от альбедо подстилающей поверхности. Например, если в поле зрения спектрометра попадает облако, то максимум смещается примерно к длине волны 465 нм. Основным механизмом сдвига коротковолнового максимума спектра является многократное рэлеевское рассеяние молекулярной компонентой атмосферы (Беляев, Катковский, 2006).

Таким образом, для получения спектров отраженного излучения объектов у поверхности Земли по данным космических измерений необходимо проведение атмосферной коррекции, т.е. учет полного пропускания атмосферы. Простейший вариант атмосферной коррекции, нередко используемый в дистанционном зондировании, состоит в вычитании вклада атмосферной дымки в каждом спектральном канале. При этом понимается, не учитывается ослабление прямо прошедшего излучения, отраженного от подстилающей поверхности. В качестве значений СПЭЯ, соответствующих вкладу атмосферной дымки, могут быть использованы спектры, снятые над чистым глубоководным водоемом, расположенным вблизи исследуемой поверхности. При этом полагается, что коэффициент спектральной яркости такого водоема близок к нулю.

Нами был опробован указанный способ учета атмосферы с использованием данных съемок с борта МКС над озером Байкал. Результаты показали, что такой способ атмосферной коррекции может использоваться с некоторым приближением лишь для длин волн от 600 нм и более. Сказанное иллюстрируется рис. 7, на котором приведены спектры растительной подстилающей поверхности (приведенные к одному уровню освещения), снятые непосредственно у поверхности Земли, с борта самолета (высота около 1 км) и из космоса системой ФСС. Спектр на рисунке 7, снятый из космоса, соответствует побережью озе-

ра Байкал (растительность с редкими обнажениями каменных пород). Для этого спектра выполнена атмосферная коррекция указанным способом с использованием спектра, соответствующего рядом расположенной водной поверхности Байкала. Для длин волн менее 520 нм (во многих каналах) значения СПЭЯ полученного разностного спектра становятся отрицательными, свидетельствуя о том, что СПЭЯ водной поверхности в этой спектральной области выше, чем у растительно-почвенной поверхности.

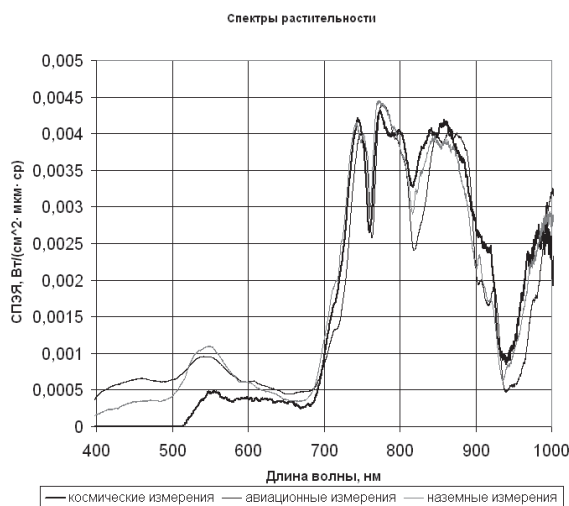


Рис. 7. Спектры растительности: наземный, авиационный и из космоса с атмосферной коррекцией

Таким образом, на основании результатов летных, авиационных и наземных испытаний ФСС в различных условиях и предварительного анализа полученной информации, подтверждено высокое качество данных и отсутствие их аналогов.

Последующая обработка получаемой информации, содержащей зарегистрированные из космоса спектры высокого разрешения, с их точной пространственной привязкой к изображениям высокого пространственного разрешения, с использованием новых методов обработки позволит перейти к более эффективным и точным алгоритмам автоматической классификации объектов, включая разделение снега и облаков, других тематических задач, с целью практического использования результатов космического эксперимента «Ураган».

## Литература

1. Беляев Б.И., Беляев Ю.В., Домарацкий А.В., Катковский Л.В., Крот Ю.А., Роговец А.В., Хвалей С.В. Фотоспектральная система для космического эксперимента «Ураган» *Космічна наука і технологія*. 2010г., Т. 6, № 2, С. 41–48
2. Беляев Б.И., Домарацкий А.В., Катковский Л.В., Крот Ю.А., Роговец А.В., Сосенко В.А., Хвалей С.В. Характеристики фотоспектральной системы и методика проведения съемок в космическом эксперименте «Ураган» // *Космічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: збірник тез. II Всеукраїнськ. Конф., Київ, Україна 14-17 червня 2010 р. Київ, 2010. С.42.*
3. Беляев М.Ю., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Десинов Л.В., Мальшев В.Б., Беляев Б.И., Сосенко В.А. Использование научной аппаратуры «Фотоспектральная система» в эксперименте «Ураган» // *Труды XLIV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники».* Калуга, 2009.



4. *Беляев Б.И., Катковский Л.В.* Оптическое дистанционное зондирование // Минск: БГУ, 2006. 455 с.
5. *Крот Ю.А., Беляев Б.И., Катковский Л.В., Роговец А.В., Сосенко В.А., Беляев М.Ю., Рязанцев В.В., Малышев В.Б.* Методики съемок и обработки спектров и изображений фотоспектральной системой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. Восьмой открытой Всероссийской конференции, Москва, 15-19 ноября 2010 г. / Москва: ИКИ РАН. 2010. С. 35-36.
6. *Роговец А.В., Беляев Ю.В., Катковский Л.В., Казак А.А., Курикина Т.М., Цикман И.М.* Методические аспекты спектрально-энергетических калибровок оптической аппаратуры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. Восьмой открытой Всероссийской конференции, Москва, 15-19 ноября 2010 г. / Москва: ИКИ РАН. 2010. С. 36-37.
7. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений // М.: Техносфера, 2010. 560 с.
8. *Bo-Cai Gao, Marcos J. Montes, C. O. Davis.* A Curve-Fitting Technique To Improve Wavelength Calibrations Of Imaging Spectrometer Data, Remote Sensing Division, Code 7212, Naval Research Laboratory, Washington, D.C. 20375.

## Some results of flight tests of the photospectral system PhSS

**M.Yu. Belyaev<sup>1</sup>, B.I. Belyaev<sup>1</sup>, L.V. Katkovsky<sup>2</sup>,  
Yu.A. Krot<sup>2</sup>, A.V. Rogovets<sup>2</sup>, E.E. Sarmin<sup>1</sup>, S.V. Khvalej<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*OJC RCC Energia, 141070, Korolev, Moscow Region., Russian Federation, Lenina str., 4-a, ,  
tel. (+7-495) 513-84-09, E-mail: Mikhail.Belyaev@rsce.ru*

<sup>2</sup>*Scientific Research Institute of Applied Physics Problems named after A.N. Sevchenko, Belarus  
State University, 220108, Minsk, Belarus, Kurchatova str., 7, tel. (+375-17)278-04-09,  
E-mail: remsens@niks.by*

The first results of flight tests of the photospectral system on the board of the ISS and the aircraft AN-2 are presented. The software developed for processing spectra and images, built in a modular fashion is described. The refinement of the calibration data of the PhSS flight specimen carried out, the stability of the spectral-energy characteristics of the system identified in the pre-flight calibrations have been analyzed and confirmed. The spectra recorded by the PhSS have been analyzed and it was shown that the resulting data will allow for a more detailed spectral analysis of the underlying surface objects.

**Keywords:** satellite imagery, image, spectrum, spatial referencing, the spectral-energy calibration, spectral radiance, preliminary processing, atmospheric correction.