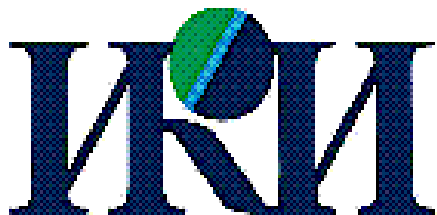




Анализ спектральных распределений яркости излучения по результатам съемки фотоспектральной системой с борта МКС





Рассматриваются следующие вопросы:



Фотоспектральная система (ФСС):

ФСС разработана по заказу ИГРАН и РКК «Энергия» для регистрации данных на РС МКС в космическом эксперименте «Ураган» (экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф)

ФСС включает в свой состав следующие оптические модули:

1) модуль регистрации изображений (МРИ) – для регистрации фотоизображений высокого пространственного разрешения в видимом диапазоне длин волн;

2) модуль спектрорадиометра (МС) – для регистрации спектров высокого спектрального разрешения отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм;



МРИ:

Пространственное разрешение:
≈10 м

МС:

Спектральное разрешение: 2нм



Цели обработки данных ФСС



*(выбор характерных спектральных зон для решения диагностических задач,
определение масштабов загрязнений территорий,
регистрация темпов движения фронта и тыла весеннего снеготаяния,
исследование динамики изменения ландшафта,
исследование крупных массивов лесов по определению состава пород и др.),*





Объем полученных с борта МКС данных

4 июля 2010 года ФСС доставлена на борт РС МКС

В июле 2010 года проведены летные испытания ФСС на борту МКС и одновременные испытания аналогичного образца (ЗИП) на борту самолета-зондировщика АН-2 над территорией Беларуси.

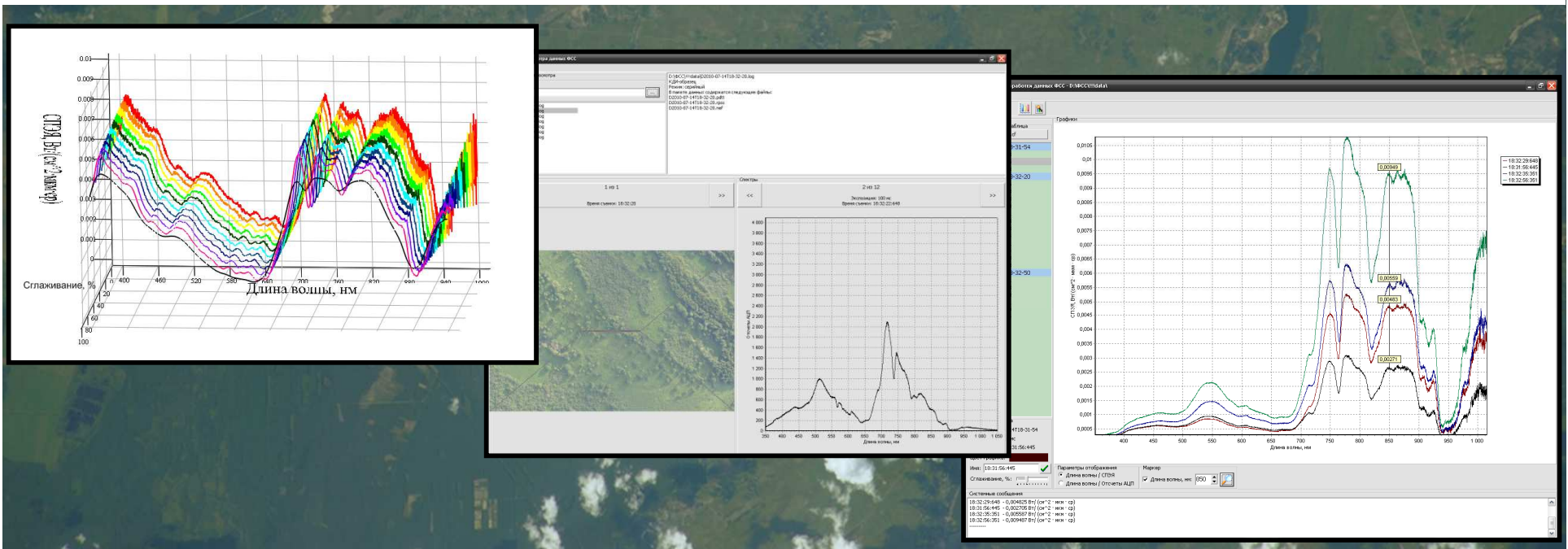
За время эксплуатации прибора на МКС:

- проведено более **30 сеансов** съемок;
- зарегистрировано более **3000 спектров** высокого разрешения;
- отснято порядка **1000 изображений**.

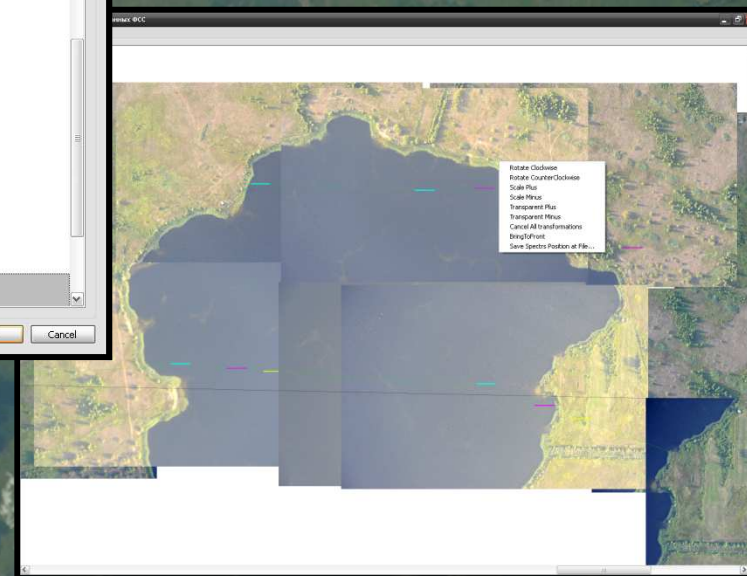
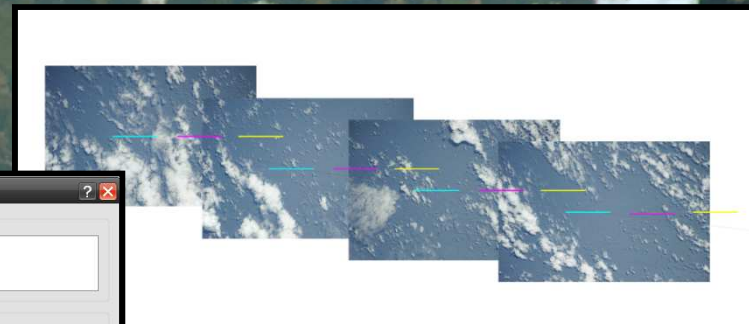
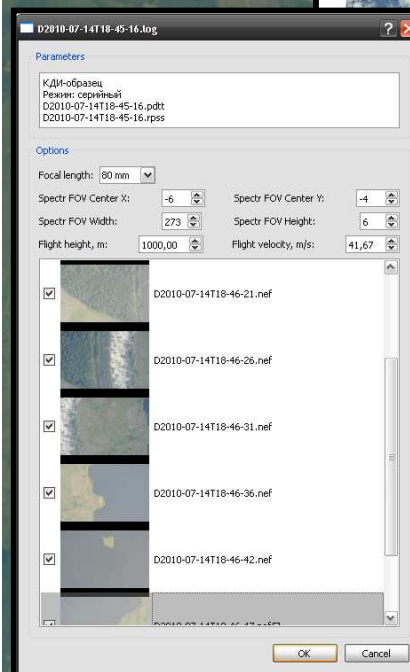
К настоящему времени большая часть данных передана на Землю, проведен анализ стабильности наземных калибровок системы, ведется тематическая обработка данных ФСС.



Программное обеспечение



Основной модуль обработки данных

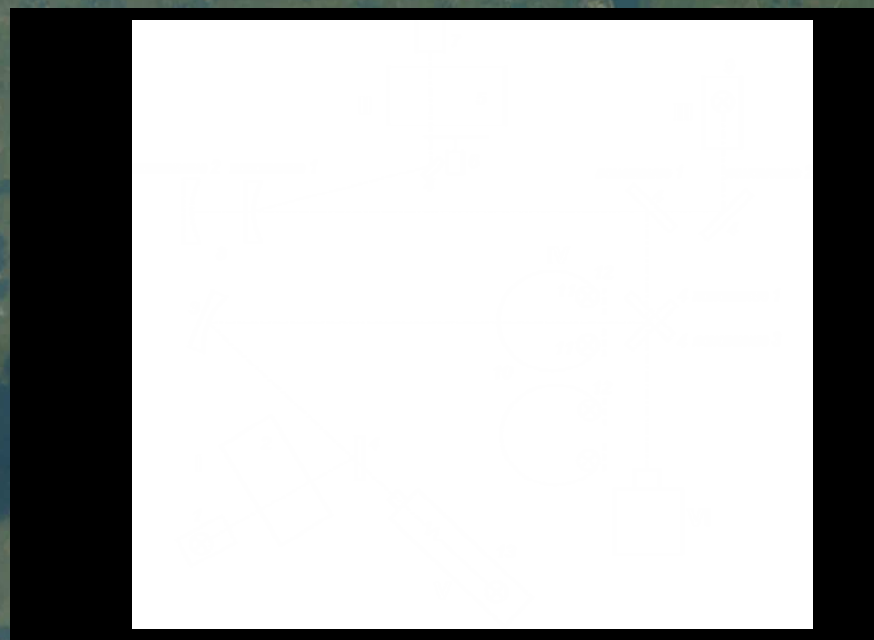
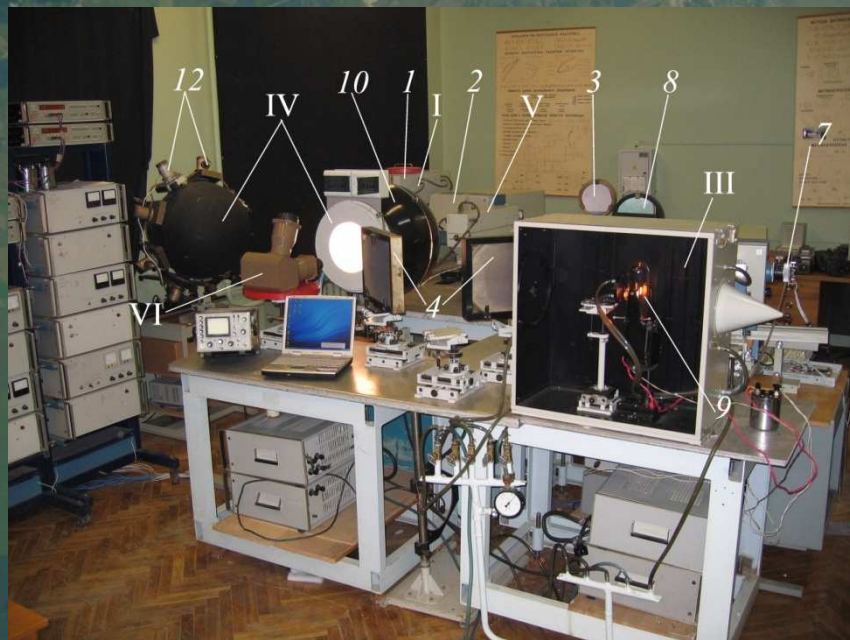


Наземные калибровки

При проведении метрологических испытаний ФСС использовался метрологический комплекс «Камелия–М», входящий в состав аккредитованной в Госстандарте Республики Беларусь калибровочной лаборатории (аттестат аккредитации № ВУ/112 02.5.0.0012) [3].

Определялись следующие спектрально-энергетические характеристики научной аппаратуры ФСС:

- спектральный диапазон МС,
- спектральное разрешение МС,
- относительная спектральная чувствительность RGB каналов МРИ
- энергетические характеристики МС (пороговая СПЭЯ и верхний предел СПЭЯ, динамический диапазон, абсолютная спектральная чувствительность),
- углы поля зрения МС, взаимная ориентация полей зрения МС и МРИ

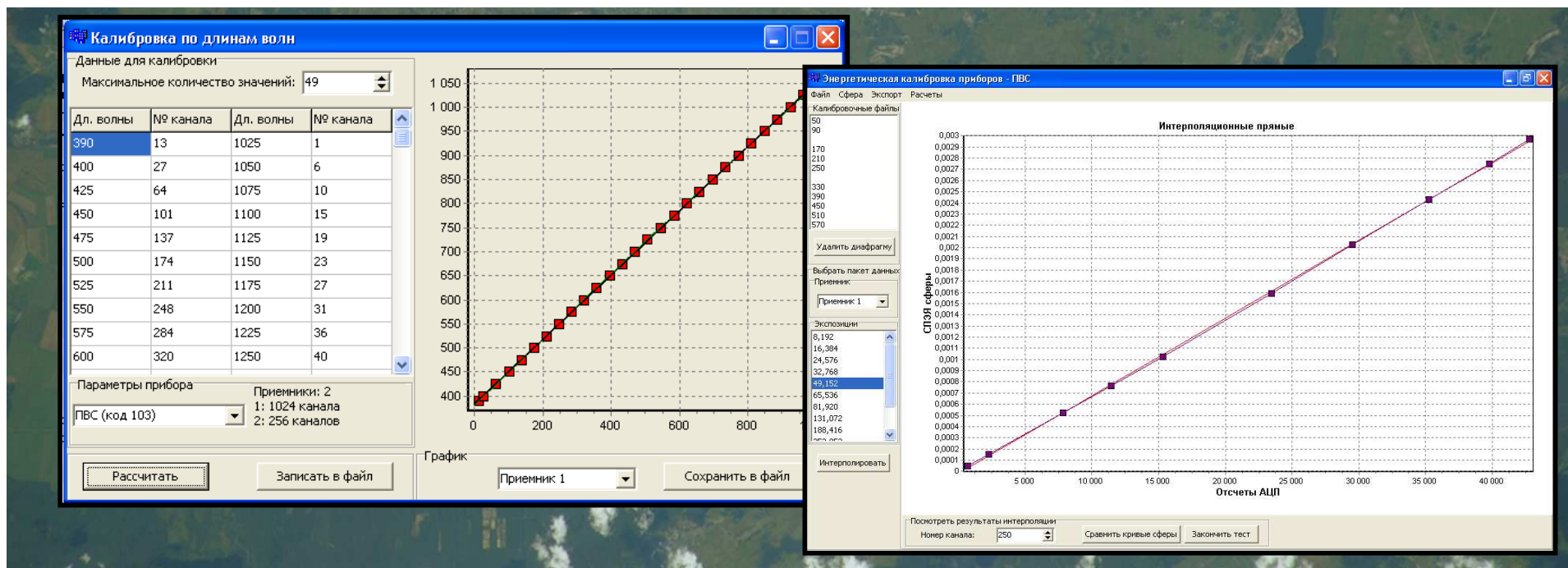


Анализ стабильности наземных калибровок

Изменения в значениях наземных калибровок приборов 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.

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

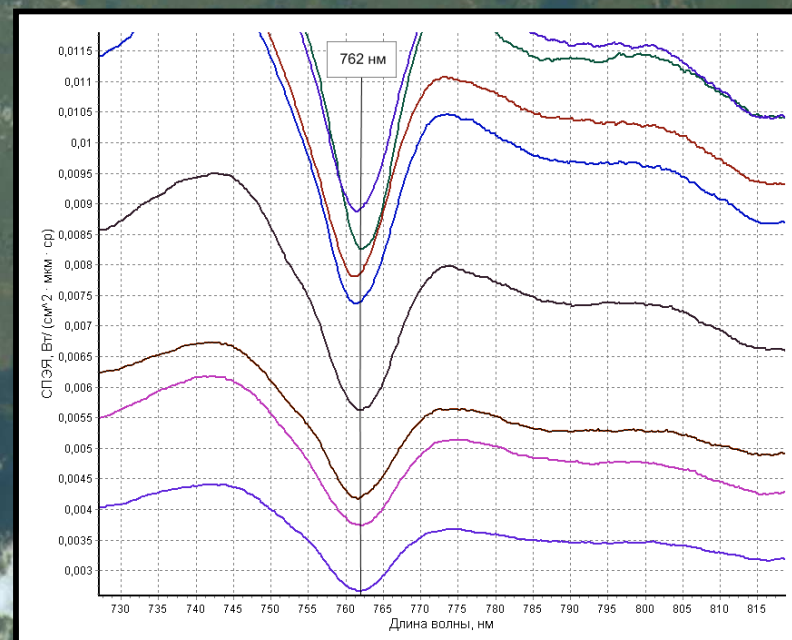
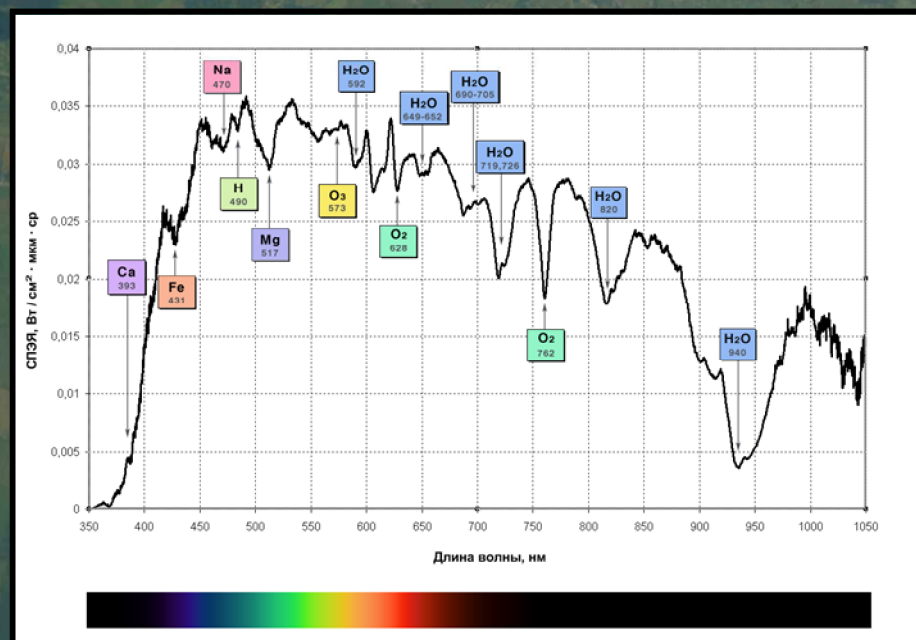
- калибровка по длинам волн спектрометра;
- калибровка по СПЭЯ спектрометра;
- взаимная ориентация полей зрения МС и МРИ.



Анализ калибровки по длинам волн

Сдвиги в положении каналов спектрорадиометра 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.

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.



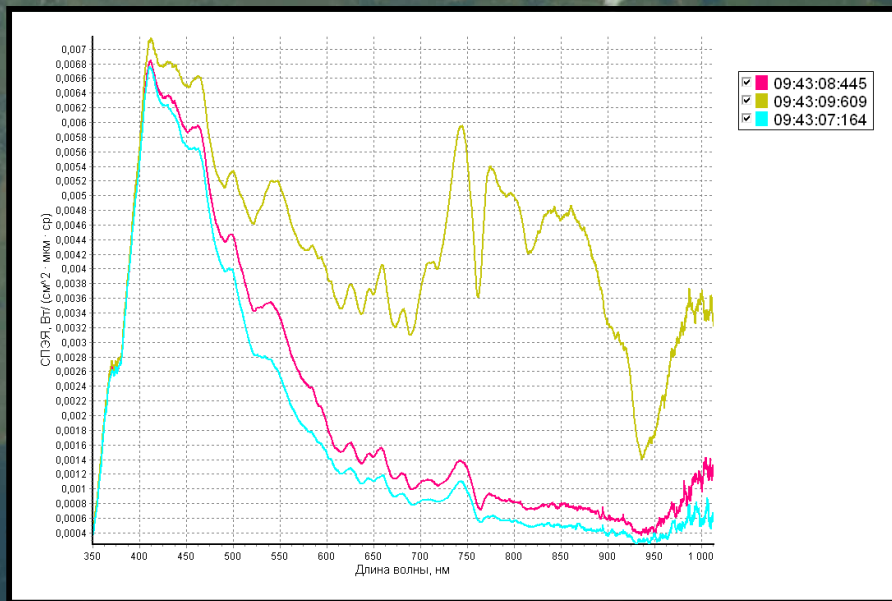
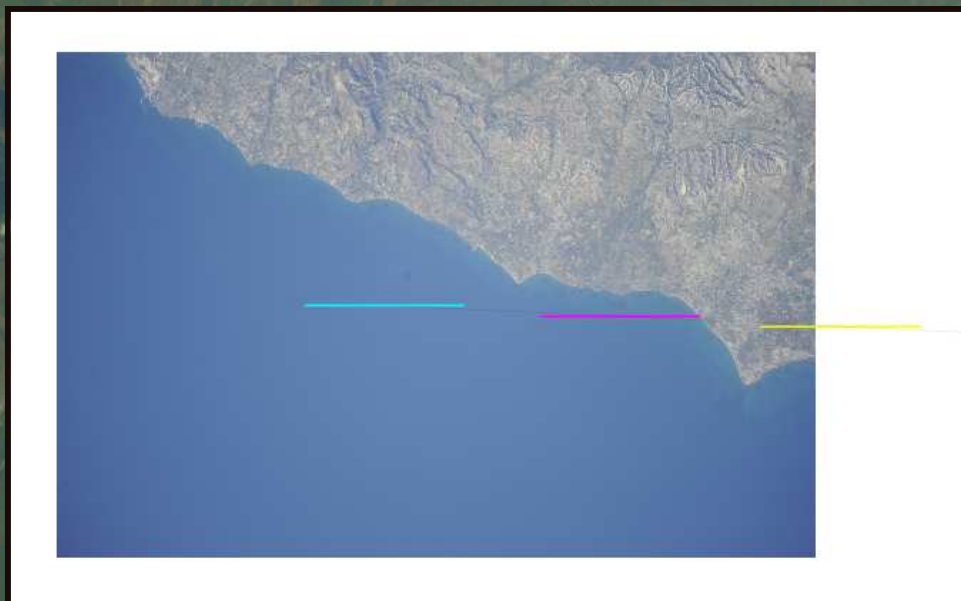
Анализ калибровки по яркости

Для оценки спектральных кривых яркости регистрируемого излучения были использованы теоретические модели переноса излучения. Были проведены расчеты для ряда полученных из космоса спектров, с использованием данных наземных измерений подстилающих поверхностей, информации о параметрах атмосферы в момент съемки, положении Солнца и углах наблюдения.



Анализ взаимной ориентации полей зрения

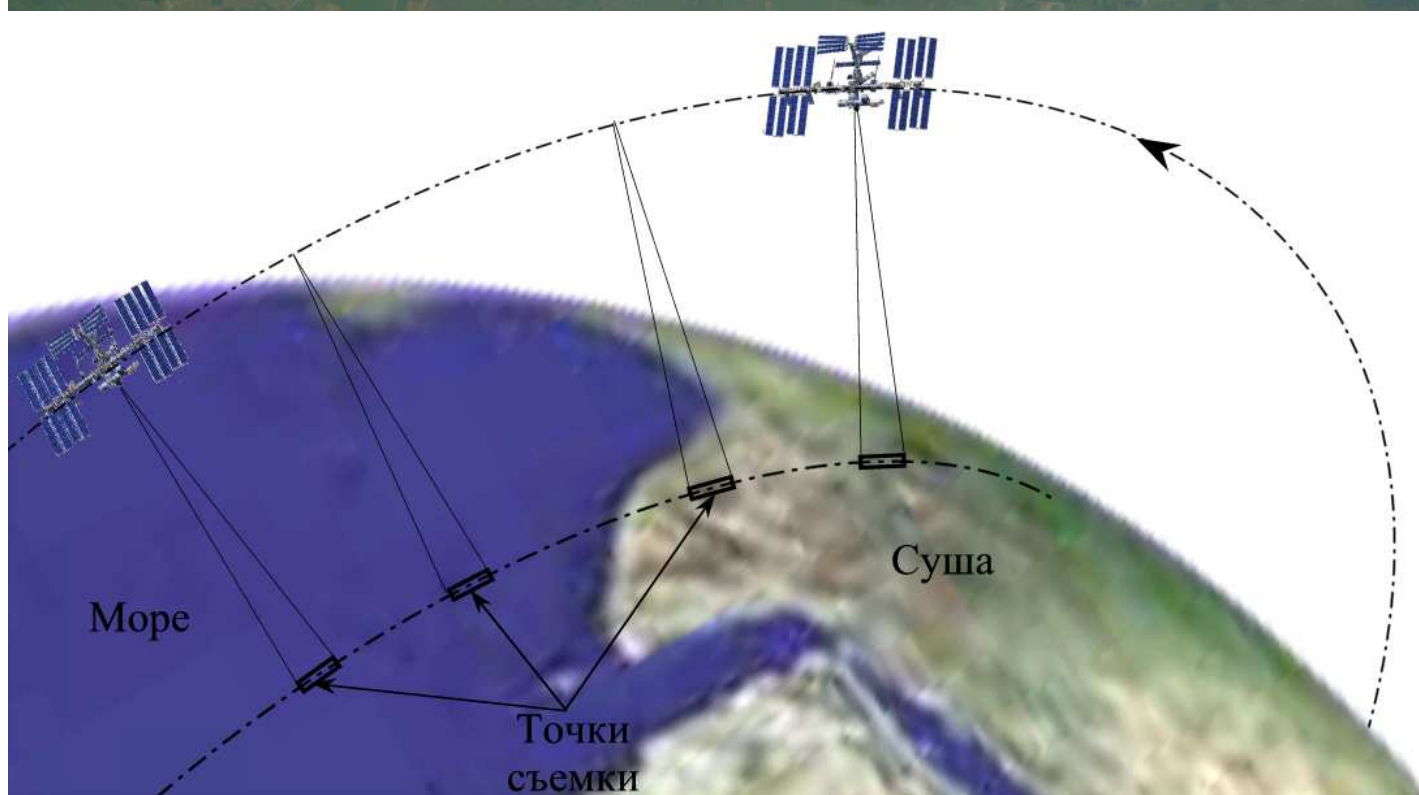
При съемках с борта МКС ФСС закрепляется на кронштейне иллюминатора, и информация с датчиков углов поворота оптических осей записывается в момент регистрации каждого спектра и изображения. Таким образом, можно однозначно определить пространственную привязку спектрометрируемых участков к соответствующим изображениям. По результатам съемки контрастных объектов 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.



Эксперимент «Калибровка по контрастным поверхностям»

Цель эксперимента:

- тестирование и уточнение взаимной ориентации полей зрения МС и МРИ,
- контроль энергетических калибровок МС и МРИ,
- определение пространственно-временного соответствия кадров фотоизображения и областей спектрометрирования по оси X (вдоль направления полета).



Общие положения:

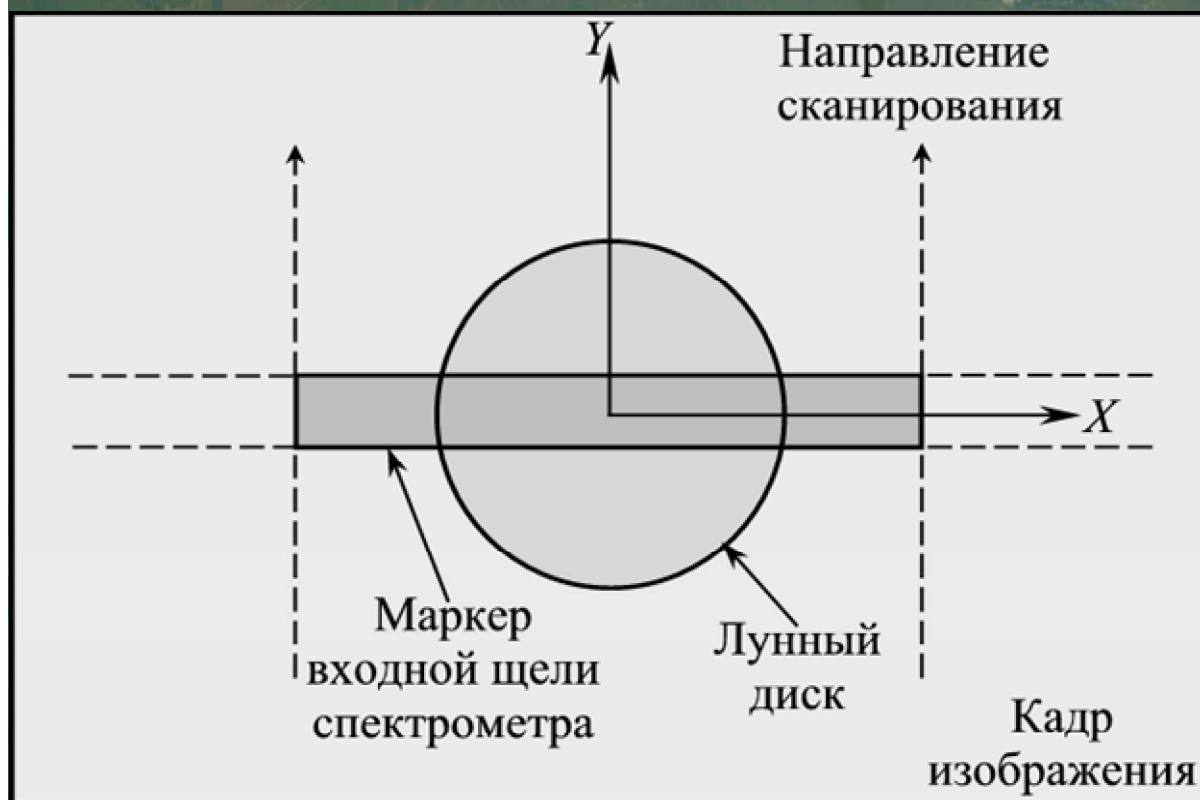
проводится при пересечении подспутниковой точкой (траекторией) береговой линии моря. Вода и суша являются двумя граничащими контрастными поверхностями.

Способ съемки - «Трассовая съемка».

Эксперимент «Калибровка по Луне»

Цель эксперимента:

- контроль энергетических калибровок МС и МРИ;
- измерения спектральных характеристик яркости Луны;
- измерения коэффициентов спектрального пропускания иллюминатора и их изменения во времени в ходе полета;
- контроль юстировки МС и МРИ,
в частности, уточнение взаимной ориентации угловых полей зрения МС и МРИ.



Общие положения:

Съемка проводится «с рук» через один из боковых иллюминаторов, который обеспечивает наблюдение Луны в полнолуние. Величина сдвига изображения между двумя последовательными кадрами – не более 10% лунного диаметра, определяется оператором через видоискатель.

Способ съемки - «Ручное сканирование протяженного объекта»

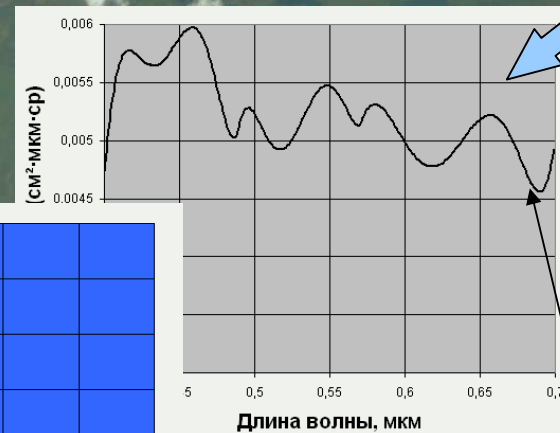
Технология восстановления спектров



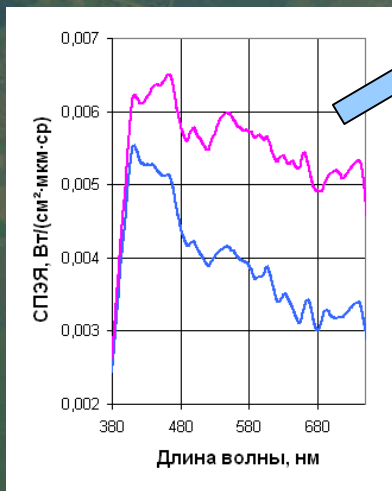
Участки спектрометрирования



Классы

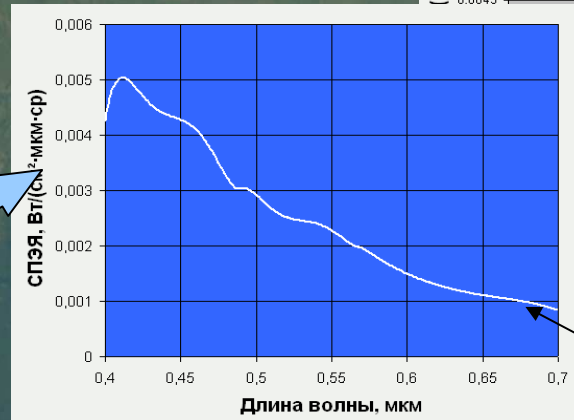


Изображение МРИ

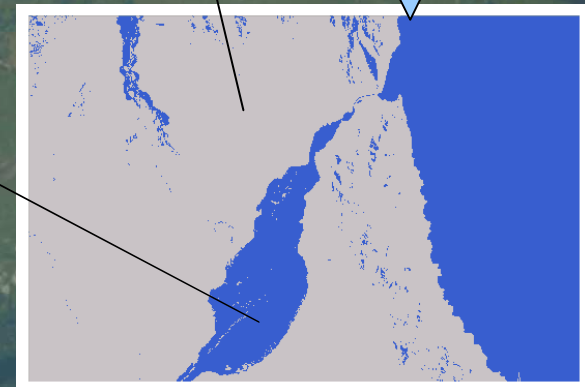


Спектры МС

Полученные спектры для классов



Классифицированное изображение



Математическая модель

$$B^{R,G,B}(\lambda_k, l) = B_n^{R,G,B}(l) \cdot \lambda_k^n + B_{n-1}^{R,G,B}(l) \cdot \lambda_k^{n-1} + \dots + B_1^{R,G,B}(l) \cdot \lambda_k + B_0^{R,G,B}(l)$$



Метод наименьших квадратов

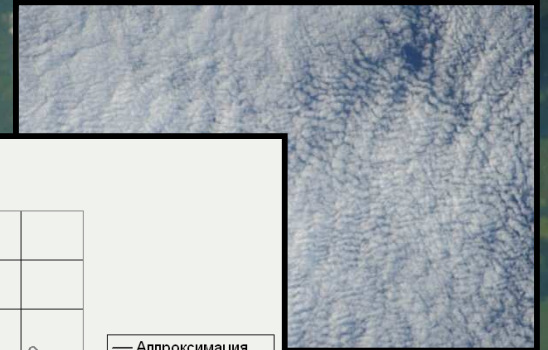
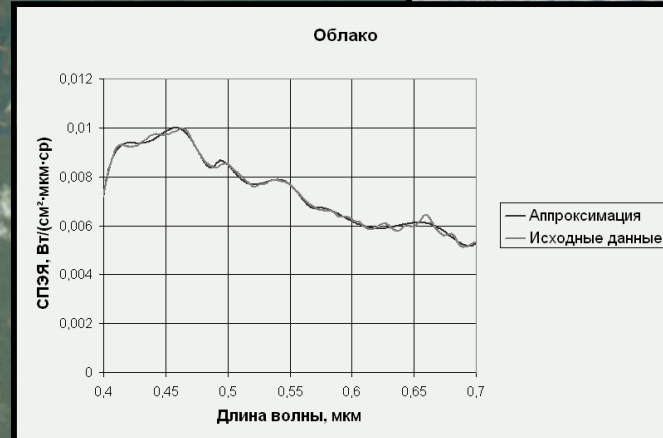
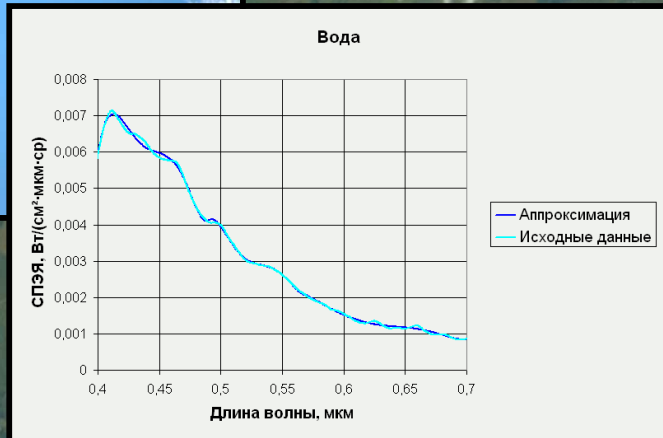
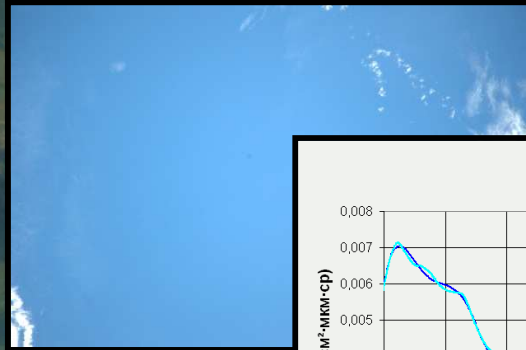
$$B_{\text{изм}}^{RGB}(\lambda, l) = \frac{L_{\text{МПИ}}^{RGB}(l) L_{\text{МС}}^{RGB}(\lambda)}{\sum_l L_{\text{МПИ}}^{RGB}(l)}$$

$$B_{\text{цел}}^{R,G,B}(\lambda_k, l) = \sum_{r=0}^n \lambda^k \cdot B_r^{R,G,B}(l) \cdot f_l$$

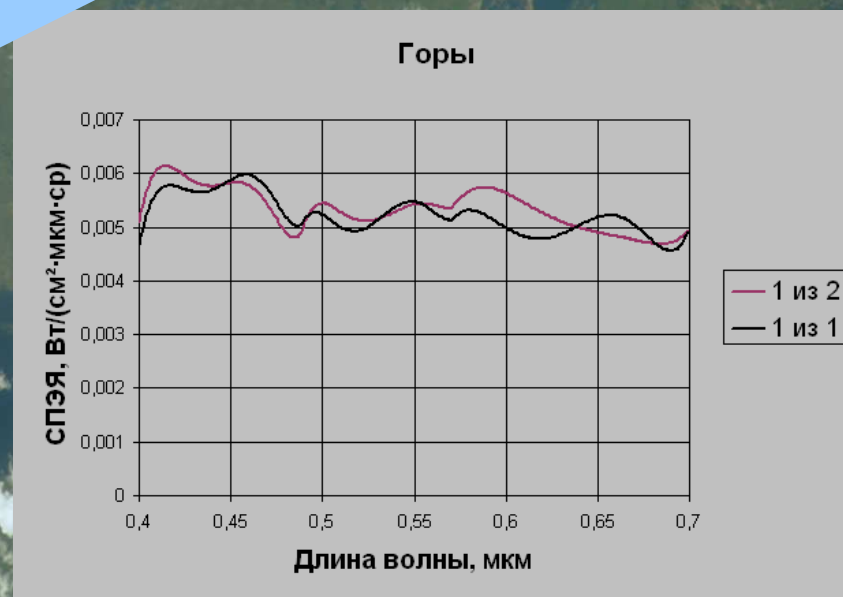
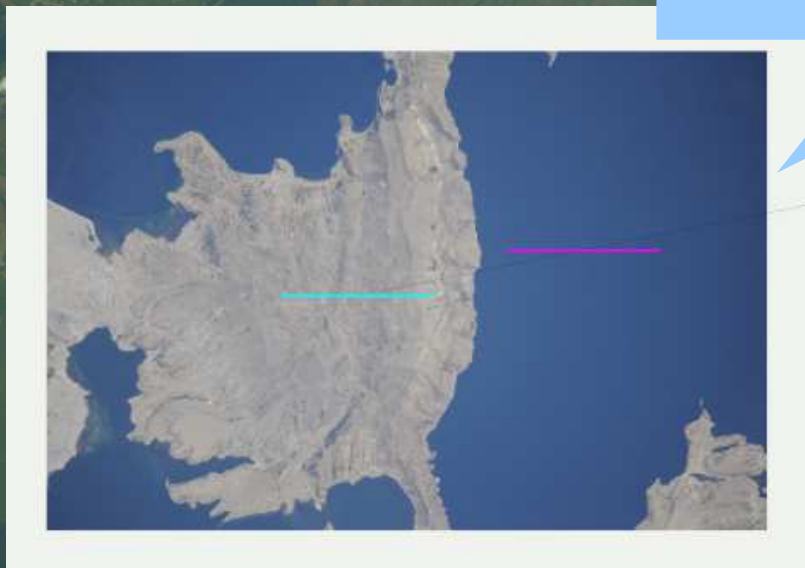
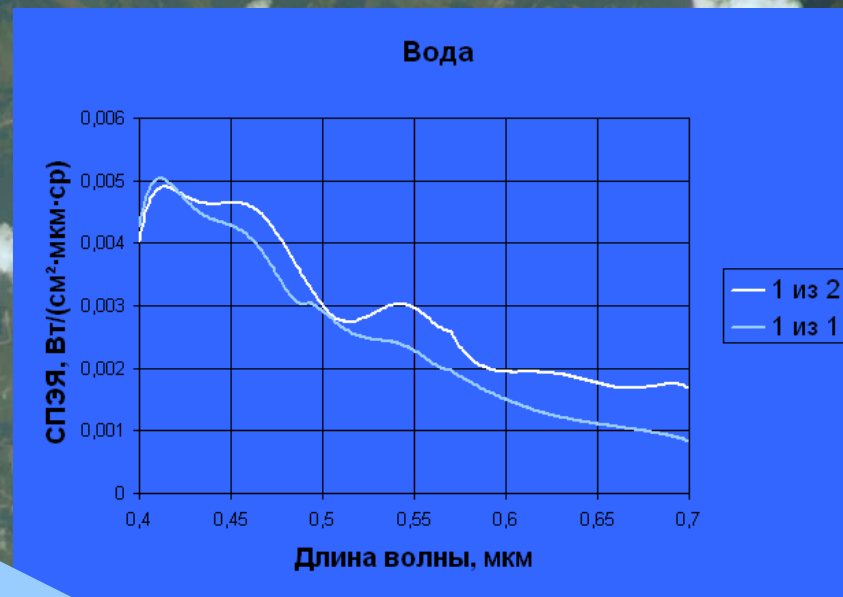
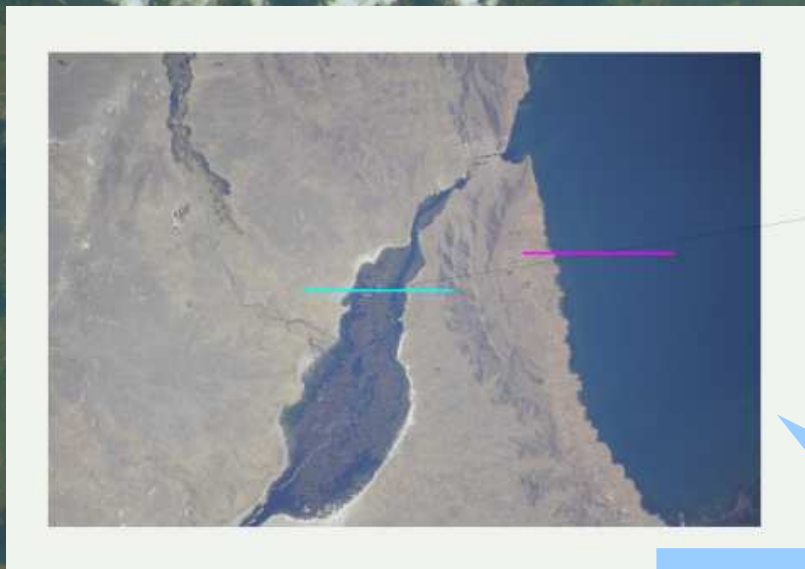
$$\delta(l) = \sum_{\lambda \in R} \left(B_{\text{изм}}^R(\lambda, l) - B_{\text{цел}}^R(\lambda, l) \right)^2 + \sum_{\lambda \in G} \left(B_{\text{изм}}^G(\lambda, l) - B_{\text{цел}}^G(\lambda, l) \right)^2 + \sum_{\lambda \in B} \left(B_{\text{изм}}^B(\lambda, l) - B_{\text{цел}}^B(\lambda, l) \right)^2$$

$$\frac{\partial \delta(l)}{\partial B_r^{R,G,B}(l)} = 0, \quad r = 0..n$$

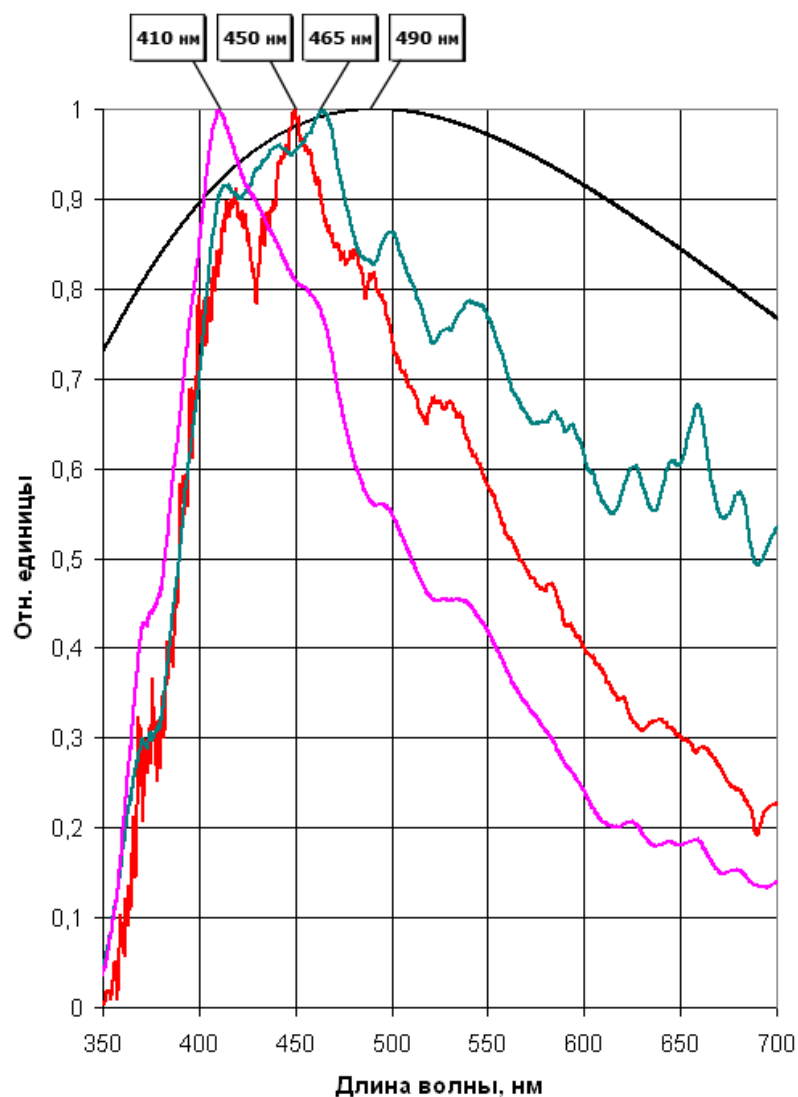
Результаты работы алгоритма



Результаты работы алгоритма



Смещение максимума в коротковолновую область

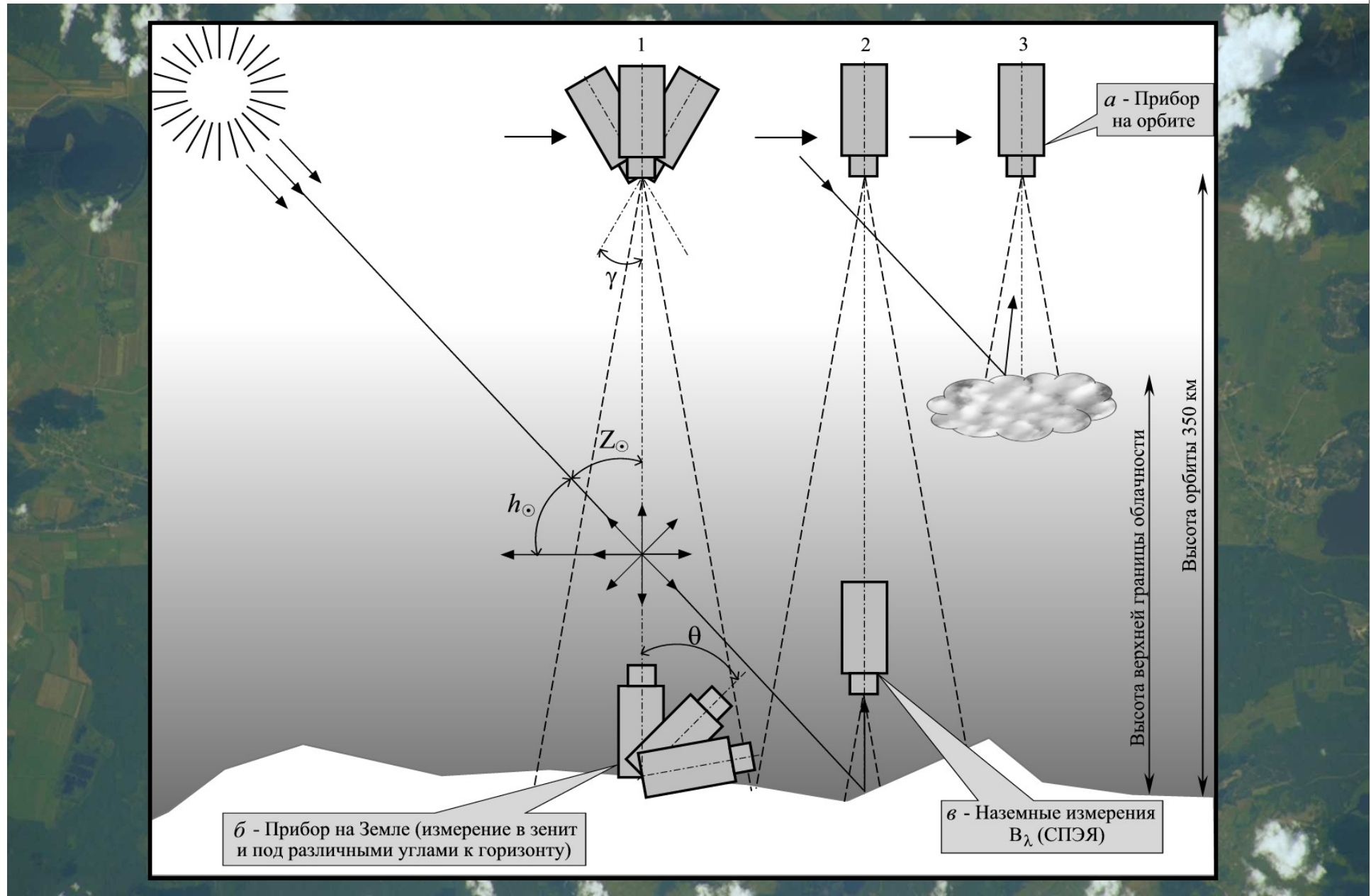


общей особенностью спектральных яркостей, зарегистрированных из космоса, для всех классов подстилающих поверхностей является подъем характеристик в синей области спектра видимого диапазона электромагнитного излучения. Этот подъем обусловлен рэлеевским рассеянием света в атмосфере.

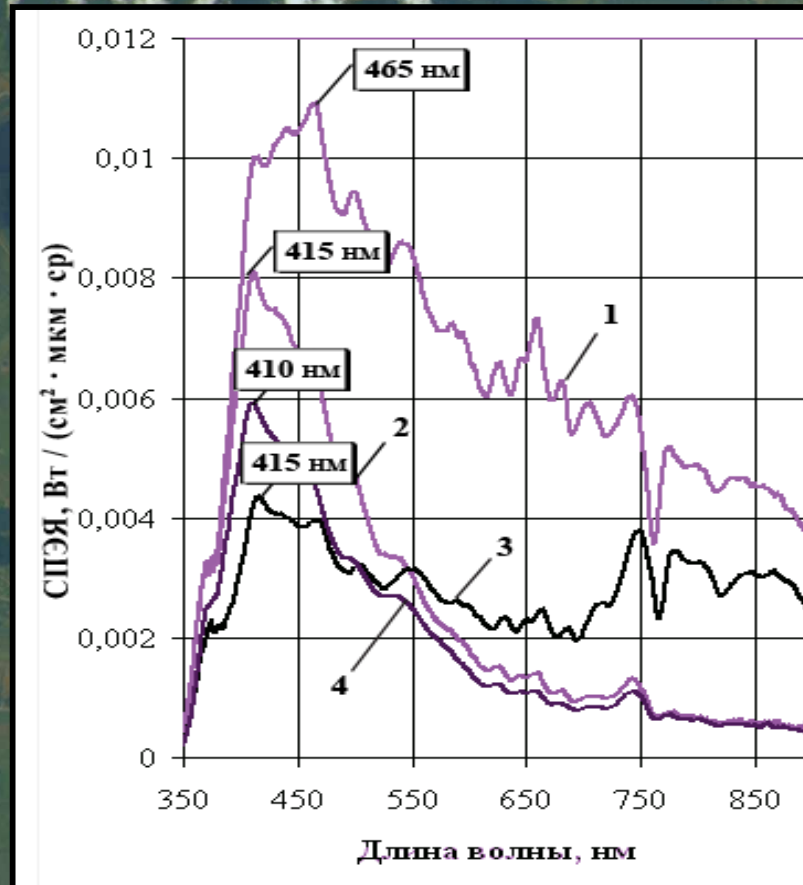
При этом максимум спектральных яркостей излучения уходящего с верхней границы атмосферы на всех спектрах смещен в коротковолновую область спектра по сравнению с максимумом спектральной солнечной постоянной.

Основным механизмом сдвига максимума спектра является рэлеевское рассеяние молекулярной компонентой атмосферы. Также проводятся исследования влияния альбедо поверхности на смещение максимума.

Схема измерений при многоуровневом исследовании

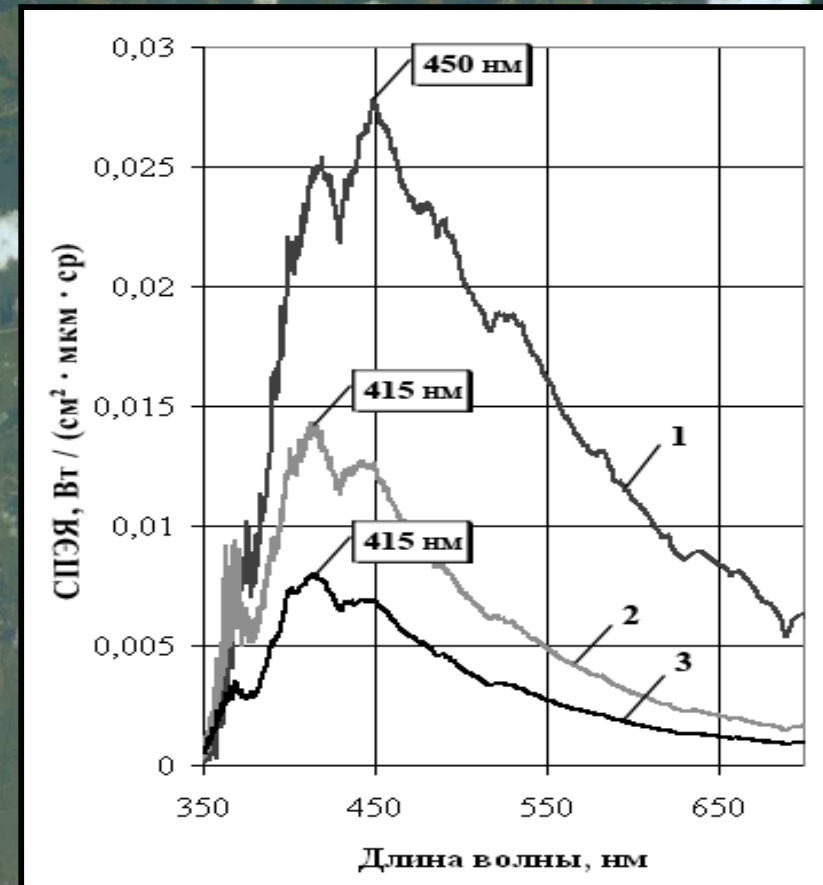


Экспериментальные данные



Измерения СПЭЯ из космоса

- 1 – облачность $Z_{\odot} = 68,8^{\circ}$;
- 2 – водная поверхность Средиземного моря $Z_{\odot} = 56,9^{\circ}$;
- 3 – растительность $Z_{\odot} = 57,0^{\circ}$;
- 4 – вода оз. Байкал $Z_{\odot} = 31,6^{\circ}$




Измерения СПЭЯ рассеянного солнечного излучения с Земли при различных углах визирования θ от зенита:

- 1 – 80° ;
- 2 – 45° ;
- 3 – 0°



Заключение



- По результатам анализа характеристик ФСС подтверждена работоспособность прибора и стабильность наземных калибровок, значения которых находятся в пределах заданных погрешностей после запуска в космос и годовой эксплуатации на борту МКС.
 - Разработана методика совместного использования спектров отраженного излучения и изображений для получения информации в тех спектральных каналах, в которых она не была зарегистрирована.
 - Экспериментально зарегистрирована количественная величина смещения максимума спектрального распределения излучения уходящего с верхней границы атмосферы в коротковолновую область по отношению к максимуму спектральной солнечной постоянной и ведется анализ данного явления.
 - Последующая обработка получаемой информации с использованием новых методов обработки позволит перейти к более эффективным и точным алгоритмам автоматической классификации объектов и других тематических задач, с целью практического использования результатов космического эксперимента «Ураган».
- 

Благодарю за внимание!



<http://remsens.by>
anna.rogovets@gmail.com