

Методика и результаты испытаний спектрофотометрического комплекса на имитаторе космического эксперимента «Гидроксил»

*Б.И. Беляев, Ю.В. Беляев, Л.В. Катковский,
Ю.А. Крот, В.М. Синельников*, В.А. Сосенко,
С.В. Хвалец*

НИИ Прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белгосуниверситета
г. Минск, Республика Беларусь
remsens@niks.by



На конкурс работ молодых ученых

Задачи испытаний

Испытанию подлежит научная аппаратура – спектрофотометрический комплекс, предназначенный к установке на Российский сегмент Международной Космической Станции для проведения исследований пространственно-временных и спектральных характеристик оптических свечений верхних слоев атмосферы в космическом эксперименте (КЭ) – «Глобальный мониторинг состояния атмосферы путем измерения интенсивностей эмиссий гидроксила и атомарного кислорода с целью разработки эмпирической модели мезосферы для прогнозирования геофизических катастроф» (шифр «Гидроксил»).

Разработчик и изготовитель НА – Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко Белорусского государственного университета, постановщик КЭ – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук, ответственный за реализацию КЭ – РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

Основными научно-техническими задачами КЭ «Гидроксил» являются:

- выявление статистически значимых закономерностей долговременной изменчивости гидроксильного излучения в области длин волн 840-1040 нм на высотах 80-93 км и излучения зеленой линии атомарного кислорода ($\lambda=557,7$ нм) на высотах 88-105 км и их связи со структурными параметрами атмосферы;
- создание эмпирической модели, описывающей распределение интенсивности гидроксильного и кислородного излучений в зависимости от гелио- и геофизических условий;
- разработка методов применения данных по гидроксильным и кислородным эмиссиям для задач прогнозирования землетрясений и предупреждения о чрезвычайных ситуациях, связанных с некоторыми типами природных и техногенных катастроф.

Геометрические параметры КЭ «Гидроксил»

Параметр	Значение
Радиус Земли R_3 , км	6400
Высота орбиты H , км	400
Высота нижней границы слоя наблюдения h_1 , км	80
Высота верхней границы слоя наблюдения h_2 , км	110
Угол от надира α_1 , соответствующий h_1 , град	72,35
Угол от надира α_2 , соответствующий h_2 , град	73,21
Линейный угол поля зрения по вертикали 2ω , град	0,86
Неопределенность ориентации осей Δ , град	0,1-15,0
Наклонение оси прибора вниз от местного горизонта γ , град	17,2
Угол при отклонении поля зрения вниз на $0,1^\circ$, α_- , град	72,25
Высота нижней границы слоя при отклонении оси вниз h_- , км	76,39
Угол при отклонении поля зрения вверх на $0,1^\circ$, α_+ , град	73,31
Высота верхней границы слоя при отклонении оси вверх h_+ , км	113,42
Дальность до центра слоя наблюдения (лимба) R , км	2013

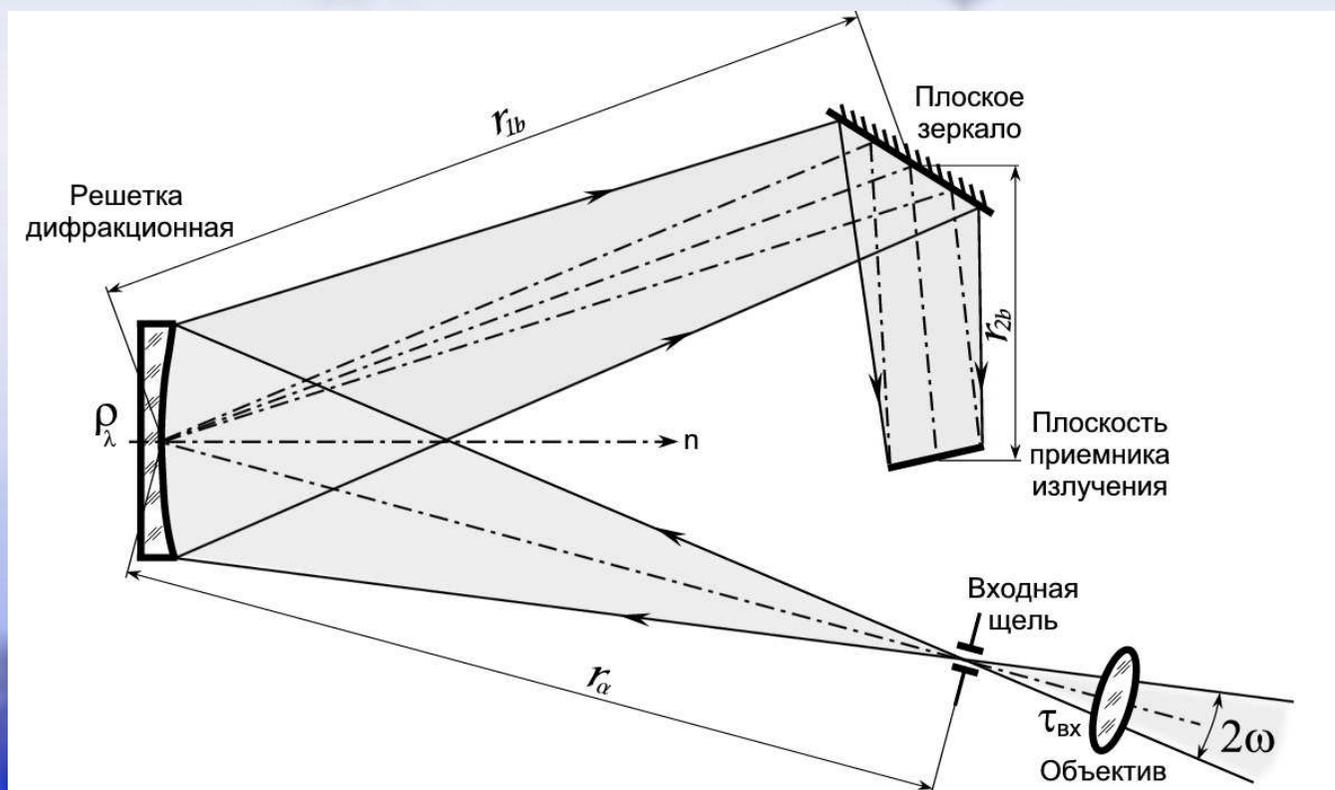
Спектрофотометрический комплекс (СФК)

состоит из блока оптических датчиков (БО) и блока электроники (БЭ).

БО устанавливается на иллюминаторе РС МКС и состоит из:

- модуля спектрального изображения МСИ,
- модуля регистрации свечения МРС,
- системы пространственного сканирования.

Оптическая схема полихроматора спектрометра с вогнутой отражательной решеткой



Расчеты спектральных и временных параметров БО СФК

Отношение сигнал/шум:

$$S/N = \frac{\frac{1}{16} P_{\lambda} N_0 \frac{D_{\text{BX}}^2}{f_{\text{BX}}^2} \eta_{\lambda} (\Delta a)^2 Q_{\lambda} T}{\left[\frac{1}{16} (P_{\lambda} + P_{\lambda}^b) N_0 \frac{D_{\text{BX}}^2}{f_{\text{BX}}^2} \eta_{\lambda} (\Delta a)^2 Q_{\lambda} T + I_d T + N_r^2 \right]^{1/2}}$$

Время экспозиции:

$$T = \frac{SNR^2}{2I_S} \left[\left(1 + \frac{I_d}{I_S} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{I_d}{I_S} \right)^2 + \frac{4N_r^2}{SNR^2}} \right]$$

где $SNR \equiv S/N$ - отношение сигнал/шум, I_d - темновой ток,

N_r - шум считывания в e^- /пиксель,

I_S - ток полезного сигнала (e^- / (пиксель·с)) вычисляется по следующей формуле:

$$I_S = \frac{1}{16} P_{\lambda} N_0 \frac{D_{\text{BX}}^2}{f_{\text{BX}}^2} \eta_{\lambda} (\Delta a)^2 Q_{\lambda}$$

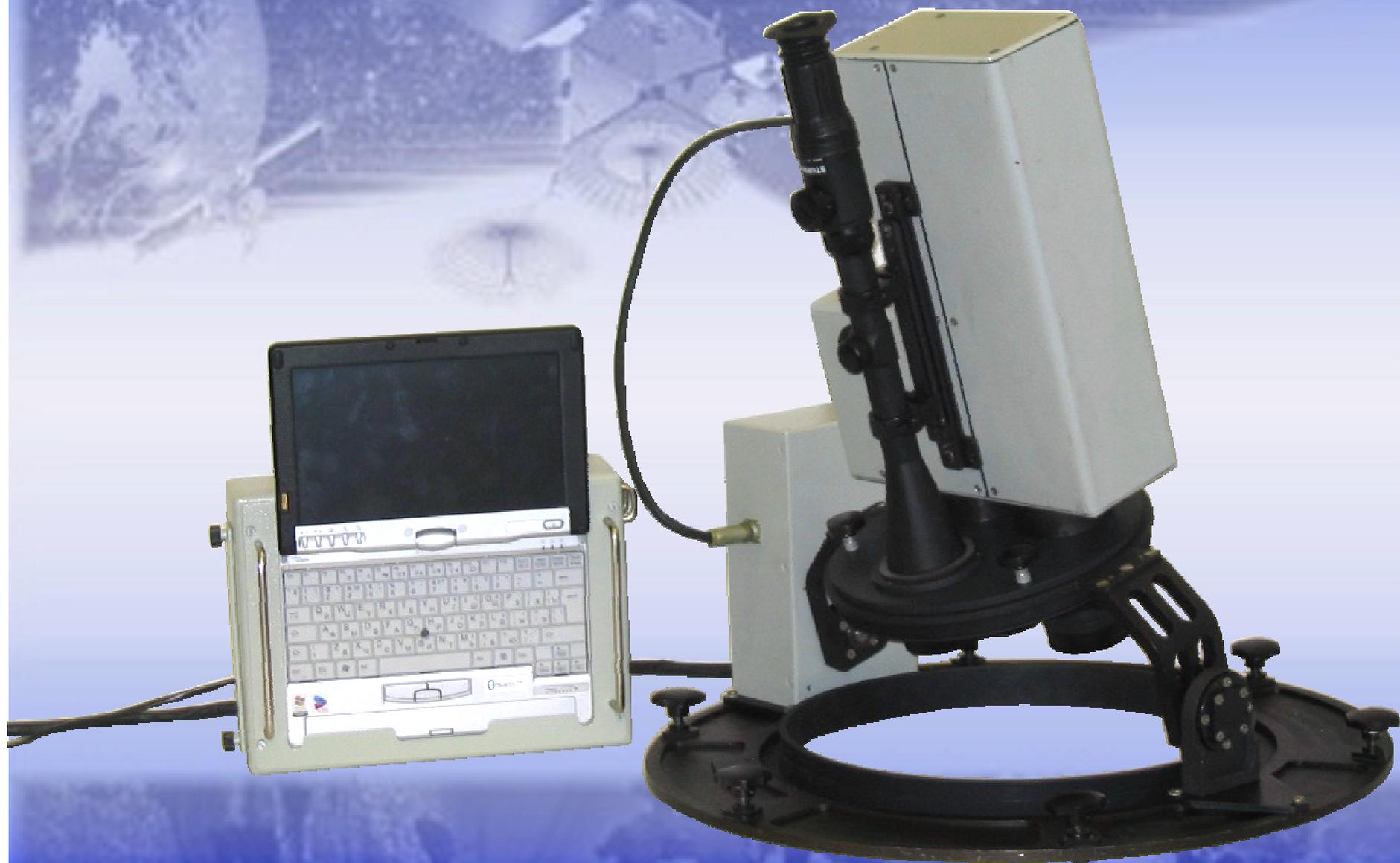
Значения параметров МСИ СФК для регистрации гидроксильных эмиссий

Параметр	Значение
Диаметр входного объектива, мм	48
Фокусное расстояние входного объектива, мм	134
Относительное отверстие вх. об.	1:2,8
Пространственное разрешение, км	<1
Спектральный диапазон, нм	830 – 1040
Спектральное разрешение, нм	1
Размер пикселя, мкм	24
Количество пикселей по вертикали	58
Количество пикселей по горизонтали	1024
Ширина входной щели, мкм	100
Высота входной щели, мм	3,2
Линейная дисперсия, мм/нм	0,12
Расстояние до источника, км	2000
Мгновенный угол поля зрения одного пикселя, град	$2,9 \cdot 10^{-2}$
Минимальный угол поля зрения по вертикали, град	0,58
Средняя яркость отдельной линии в полосах ОН при наблюдении в лимб, Рэлей	3500
Средняя квантовая эффективность ПЗС матрицы	0,6
Средний темновой ток (при $t = -25^{\circ}\text{C}$), e^- / (пиксель·с)	1
Средний шум считывания, e^- /пиксель	8
Средний ток полезного сигнала (входного потока излучения), e^- / (пиксель·с)	1,1
Время экспозиции для отношения сигнал/шум =3 (при бининге по 5 пикс.), с	30 (6)

Значения параметров МРС СФК для регистрации эмиссии атомарного кислорода

Параметр	Значение
Диаметр входного объектива, мм	38
Фокусное расстояние входного объектива, мм	134
Относительное отверстие вх. об.	1:3,5
Пространственное разрешение, км	1
Размер пикселя, мкм	50 x 500
Количество элементов	3648
Полуширина спектрального фильтра на длине волны 557,7 нм	5
Средний КПД оптического тракта	0,8
Средняя яркость линии на длине волны 557,7 нм при наблюдении в лимб, КРэлея	10
Квантовая эффективность приемной линейки на длине волны 557,7 нм	0,3
Средний темновой ток (при $t = - 25^{\circ}\text{C}$), e^- (пиксель·с)	4000
Средний шум считывания, e^- /пиксель	625
Средний ток полезного сигнала (входного потока излучения), e^- (пиксель·с)	210
Время экспозиции для отношения сигнал/шум =10, с	0,6

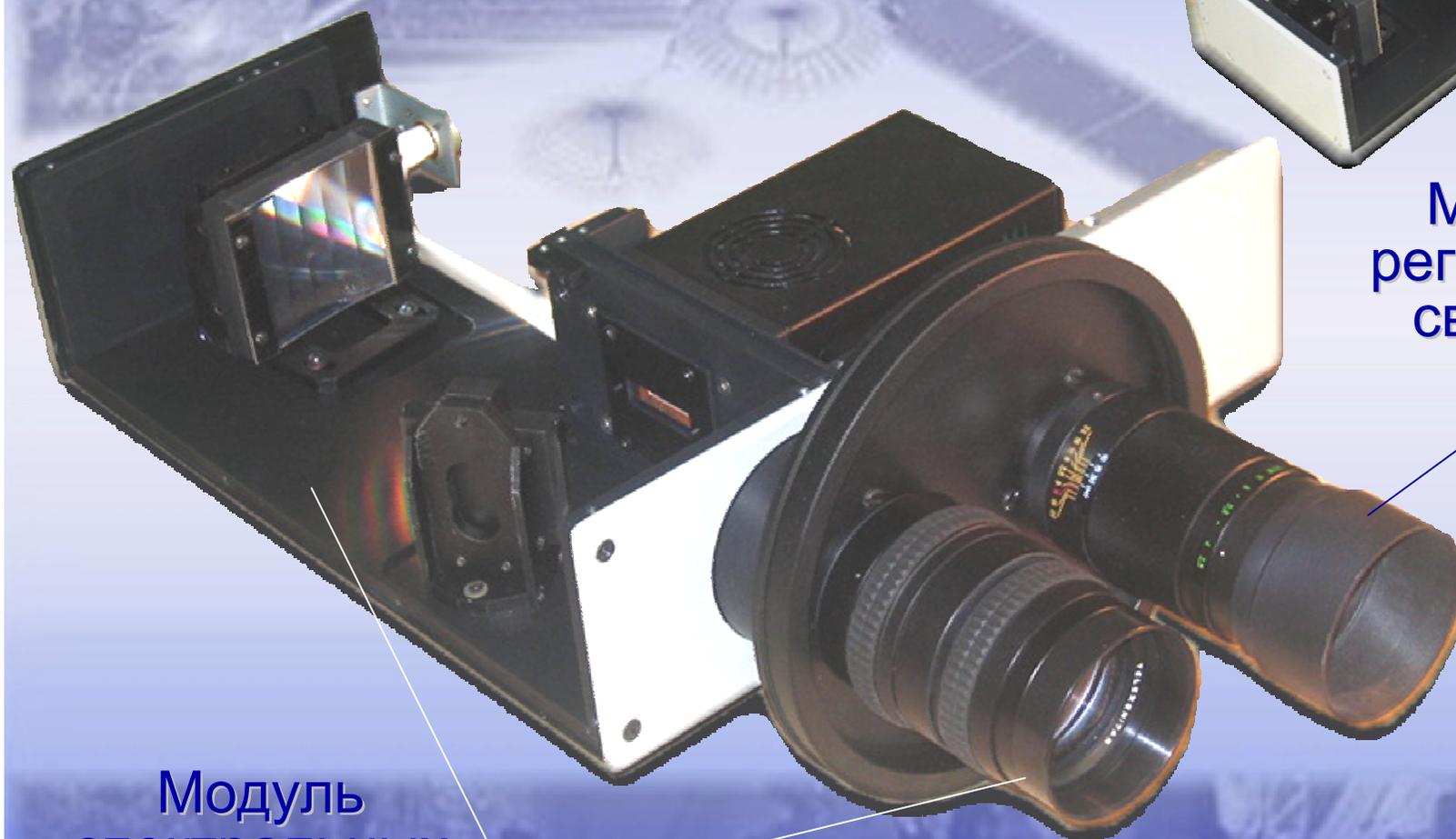
Летный образец СФК с системой пространственного сканирования



Образец
блока оптического СФК
со снятыми крышками



Модуль
регистрации
свечений
МРС



Модуль
спектральных
изображений
МСИ

Блок электроники СФК



в рабочем
положении

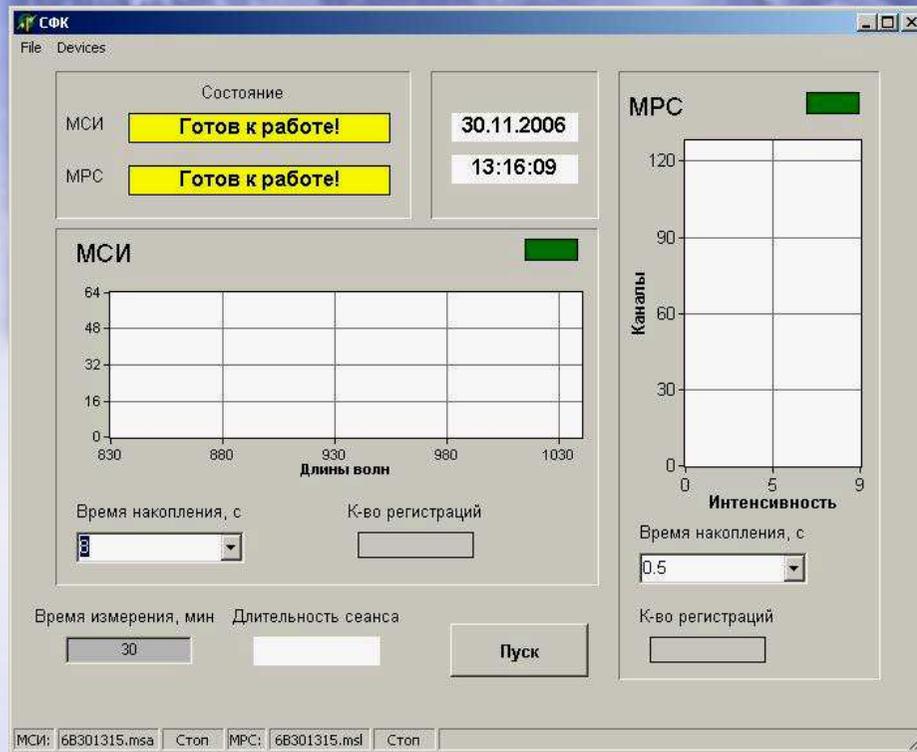


в рабочем
положении
с защищенным
экраном



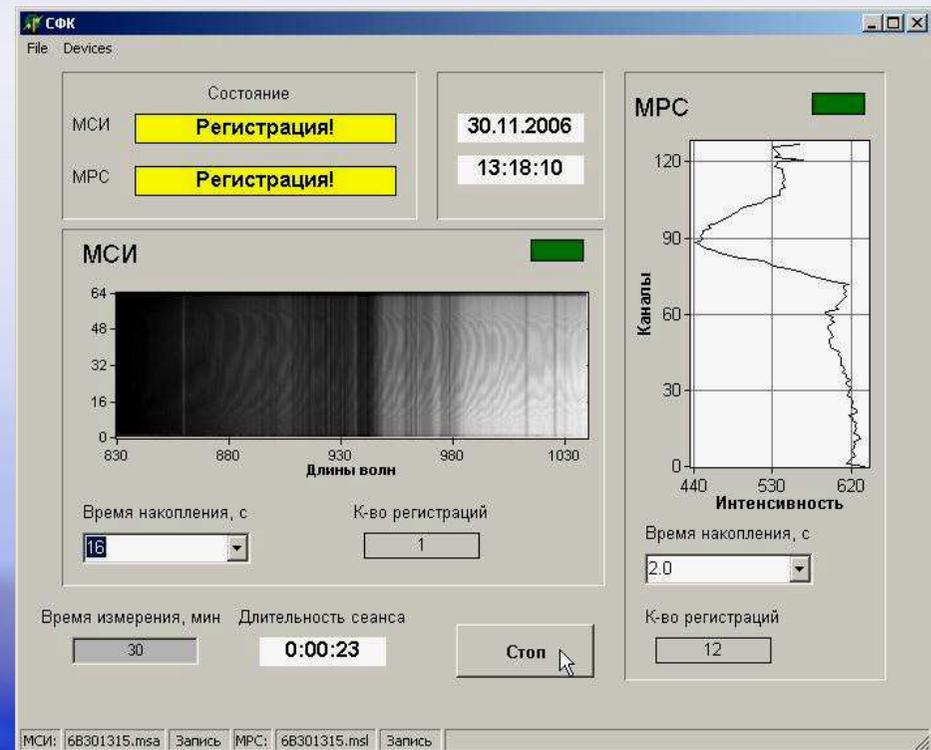
с открытой
дополнительной
клавиатурой

СГО функционирования и представления данных СФК



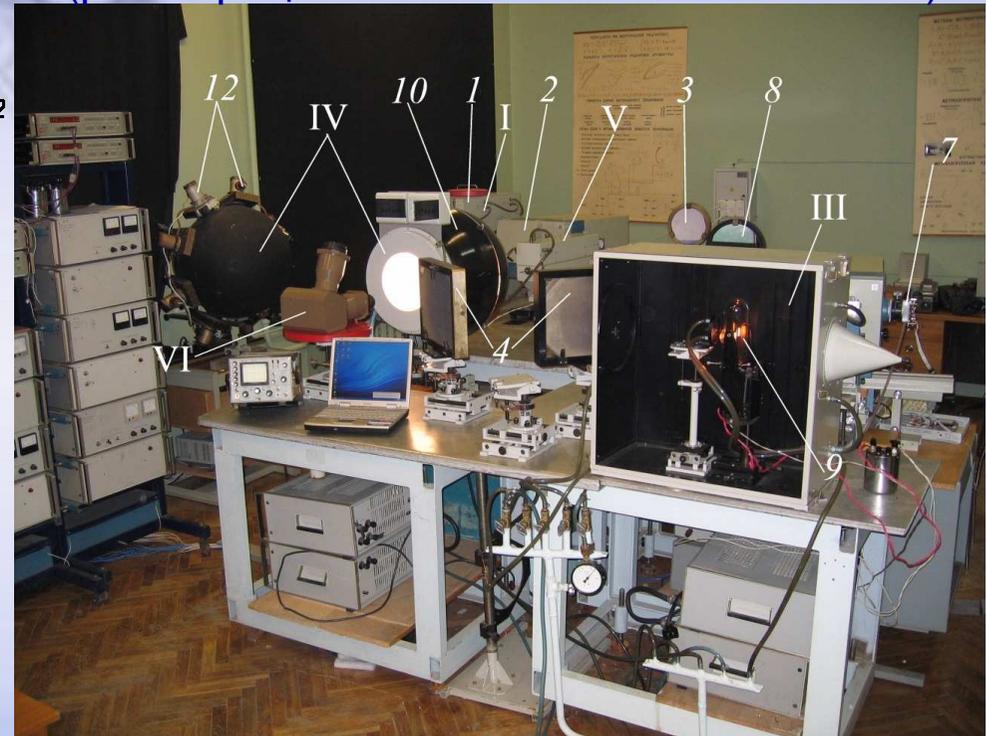
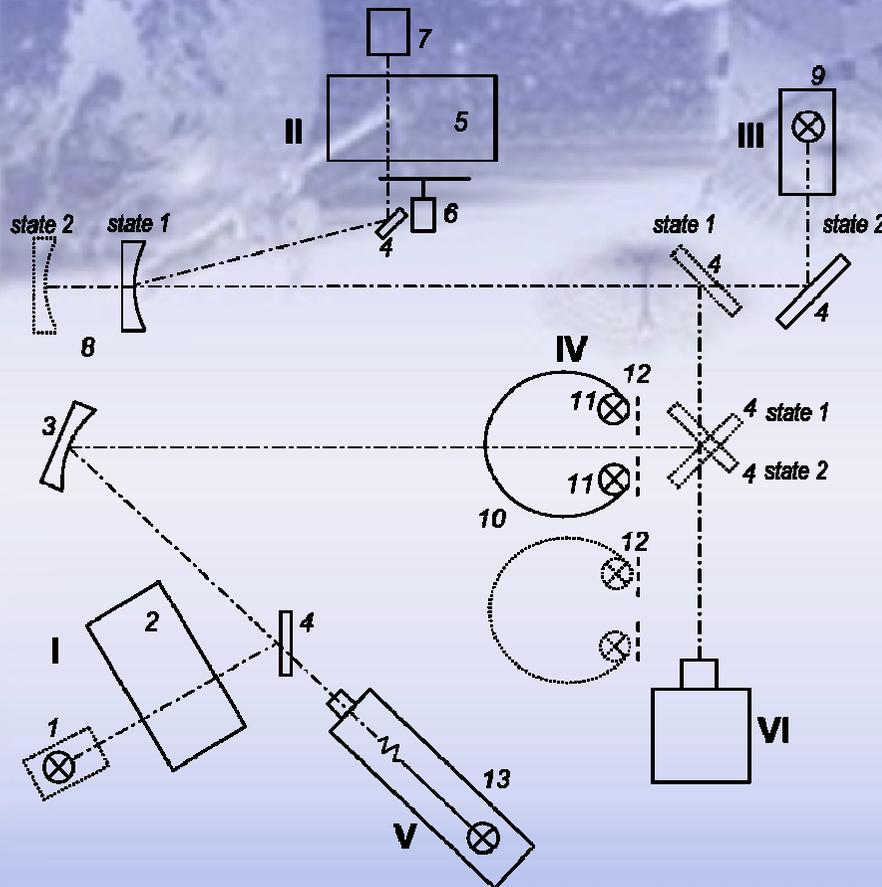
Главное окно программы СФК.EXE, предназначенной для управления работой блоком оптическим спектрофотометрическим комплексом СФК

Главное окно программы в процессе измерения



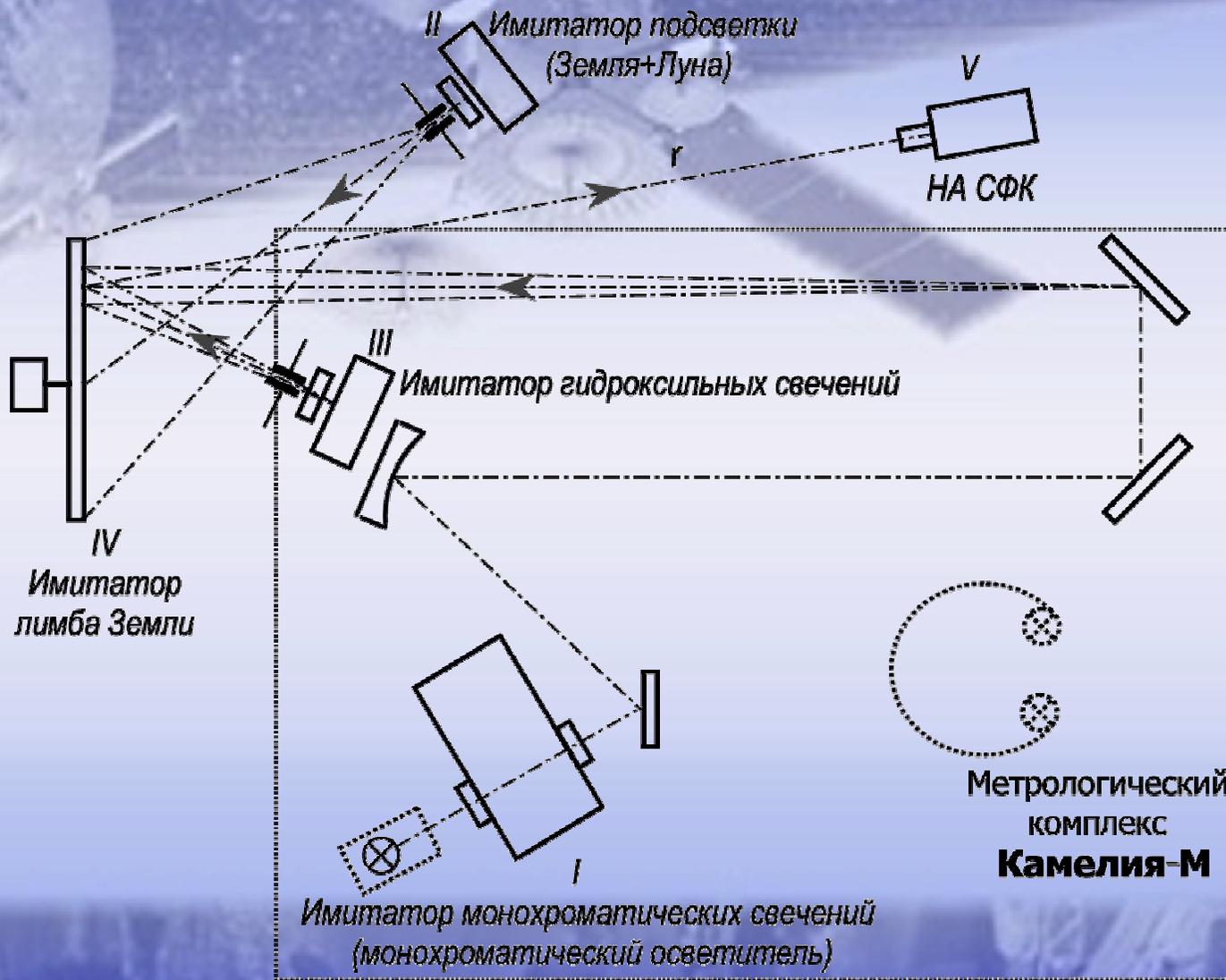
Функциональная схема и общий вид метрологического комплекса «Камелия-М»

Аккредитован в Госстандарте РБ
как калибровочная лаборатория НИИ ПФП БГУ
(регистрационный № ВУ/112 02.5.0.0012)

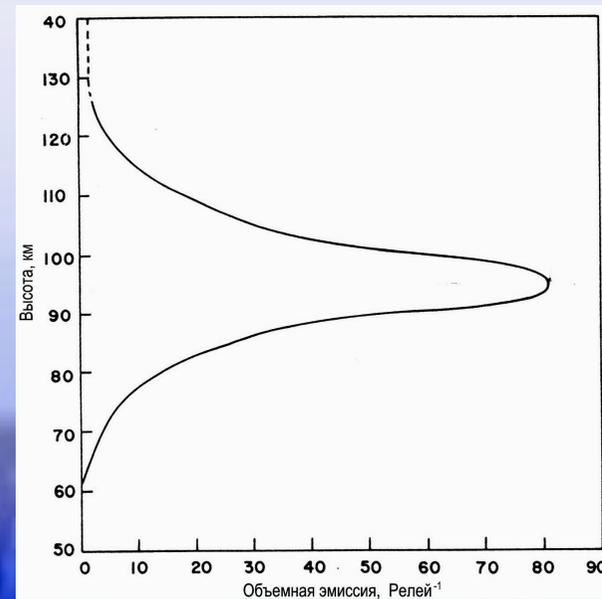
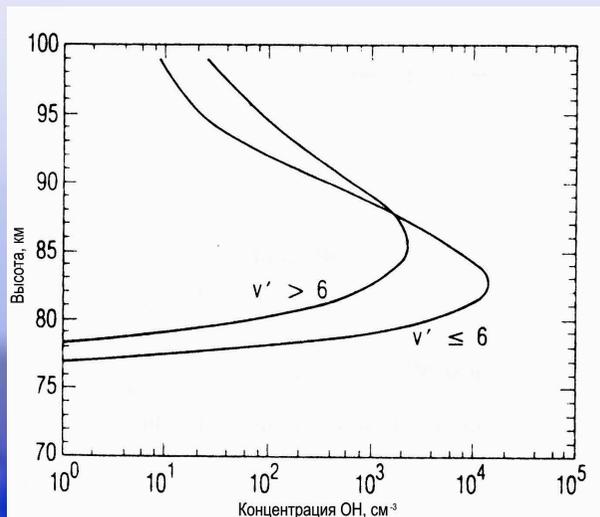
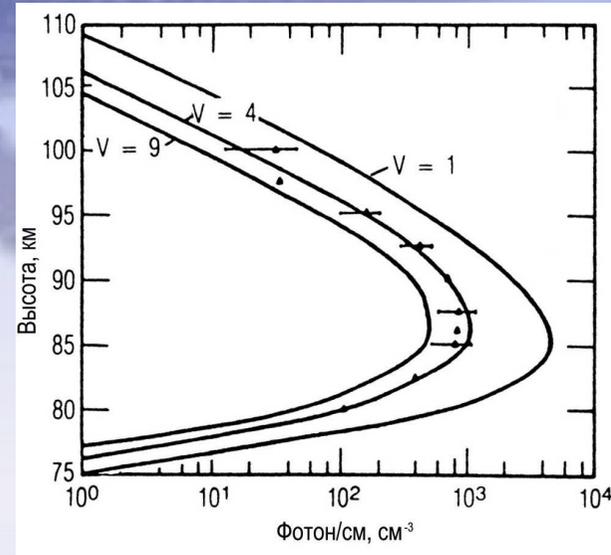
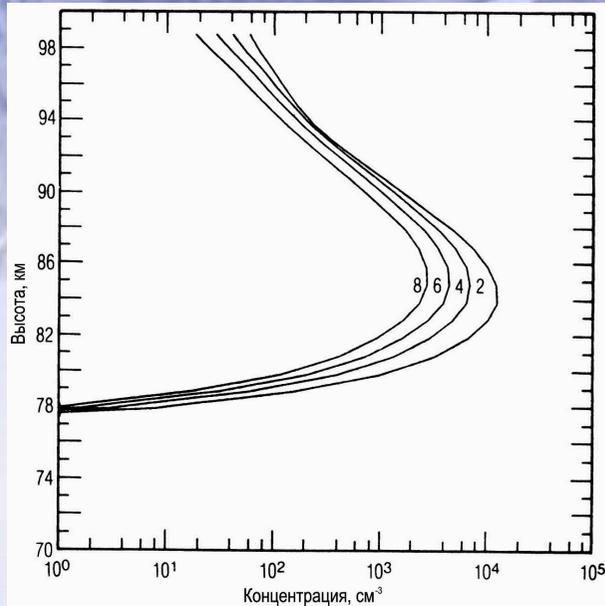


- I – монохроматический осветитель (1 – лампа ТРУ 1100-2350, 2 – монохроматор МДР-23, 3 – коллиматорное зеркало, 4 – плоские поворотные зеркала);
 II – компаратор спектральной плотности энергетической яркости (5 – монохроматор МДР-23, 6 – модулятор, 7 – блок приемников, 8 – сферическое зеркало);
 III – опорный источник (9 – образцовая светоизмерительная лампа);
 IV – диффузный излучатель (10 – фотометрическая сфера, 11 – лампы КГМ24-150, 12 – калиброванные диафрагмы);
 V – белый осветитель (13 – лампа КГМ12-150); VI – калибруемый прибор

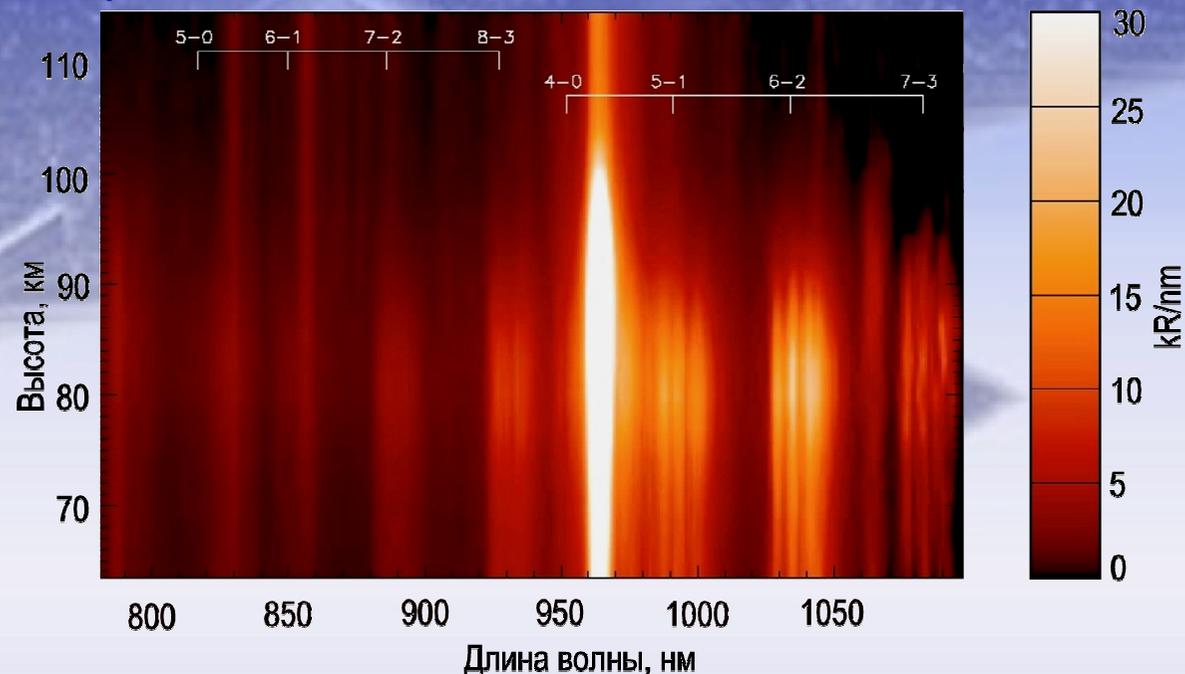
Функциональная схема блоков имитаторов, совмещенных с комплексом «Камелия-М»



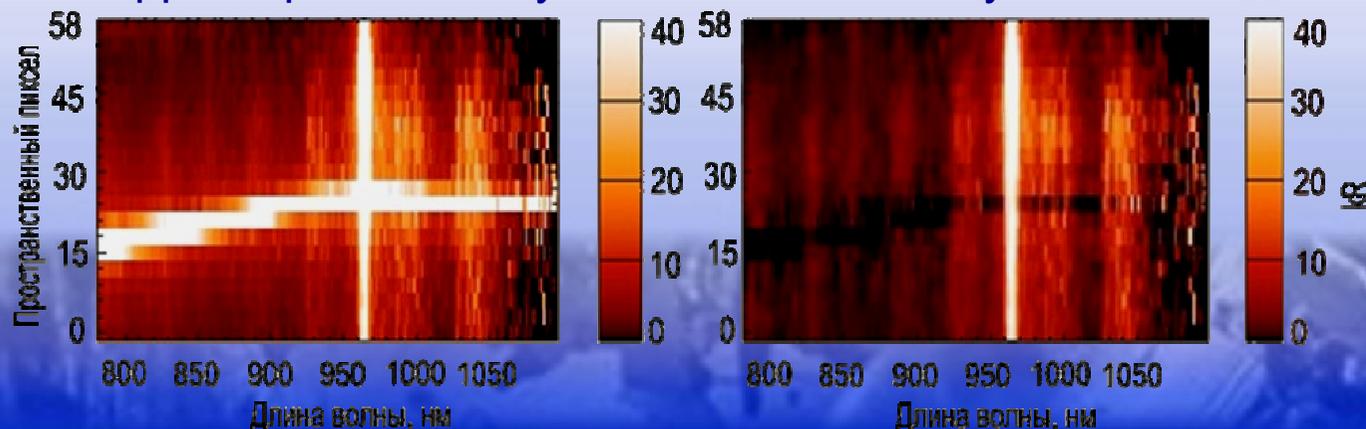
Типичные высотные распределения объемной эмиссии и концентраций возбужденных молекул гидроксила OH и атомарного кислорода



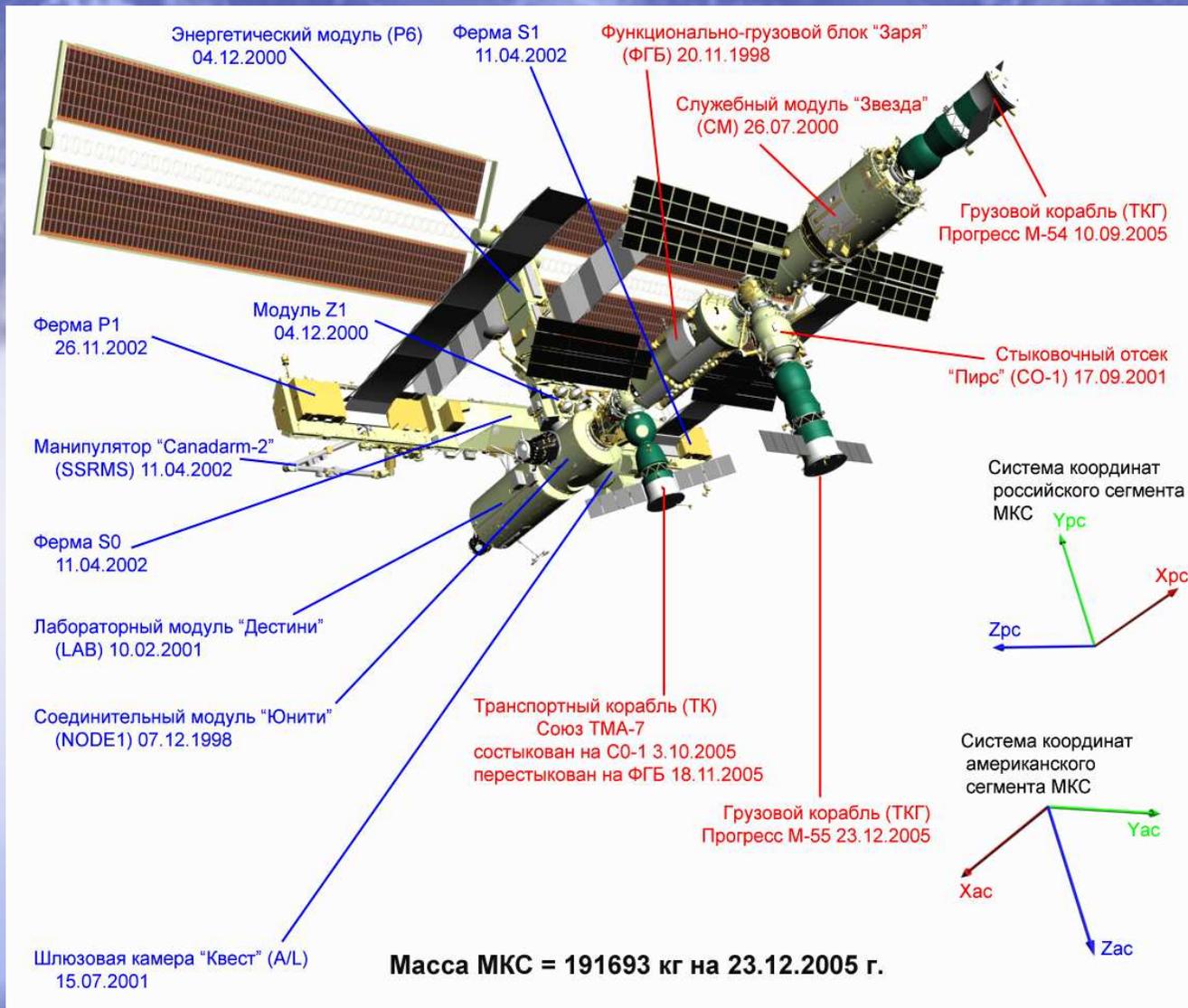
Вид изображения (компьютерная эмуляция), получаемого модулем МСИ: по оси x – развертка спектра, по оси y – высотное распределение свечения, градациями цвета показана интенсивность эмиссий



Вид изображения (компьютерная эмуляция), получаемого модулем МСИ: на левом рисунке видна траектория движения звезды относительно прибора, излучение которой находится в «зашкале», справа – изображение, скорректированное путем вычитания излучения звезды

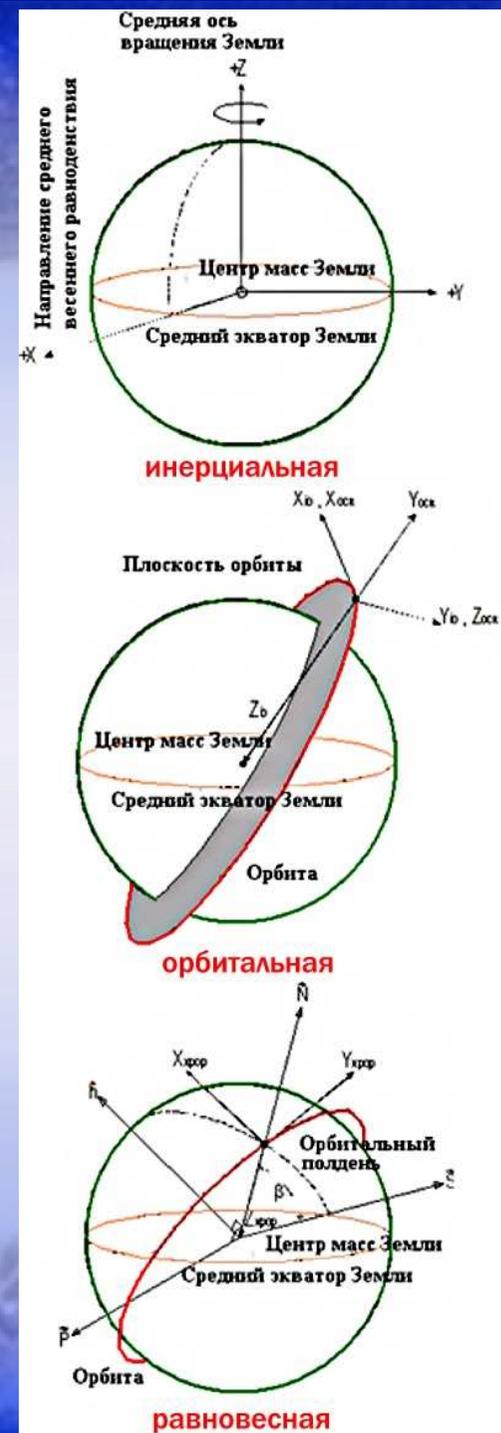


Специальные системы координат для ориентации МКС



Связанные системы координат РС и АС МКС

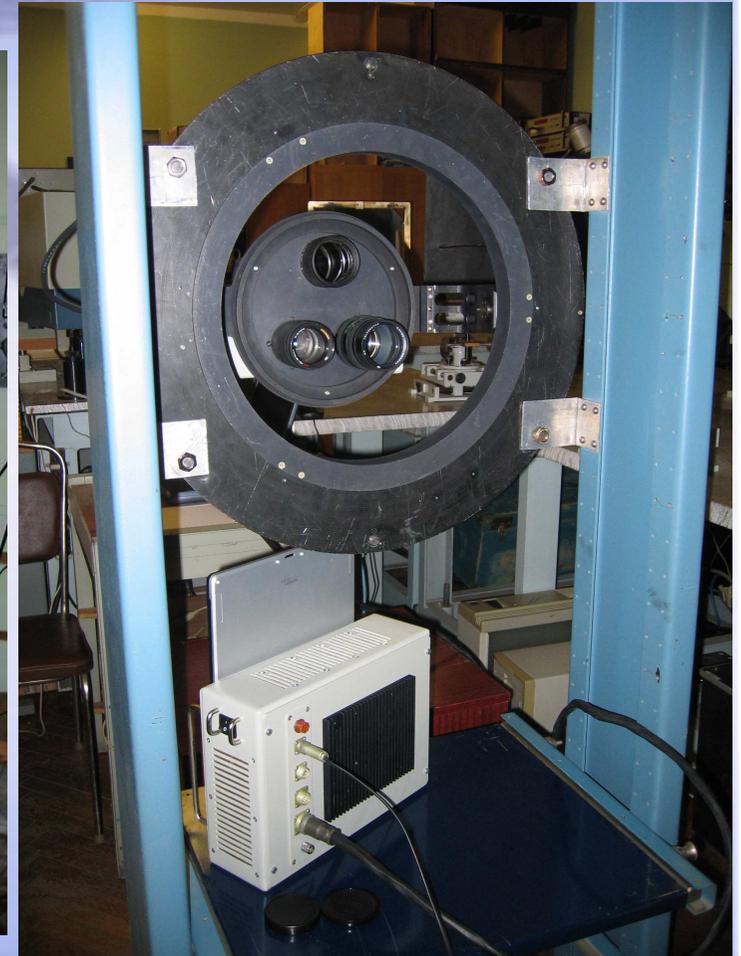
Точность углового положения МКС от $\pm 0,1$ до ± 15 град.
 Максимальная угловая скорость МКС от 0,005 до 0,05 град./с



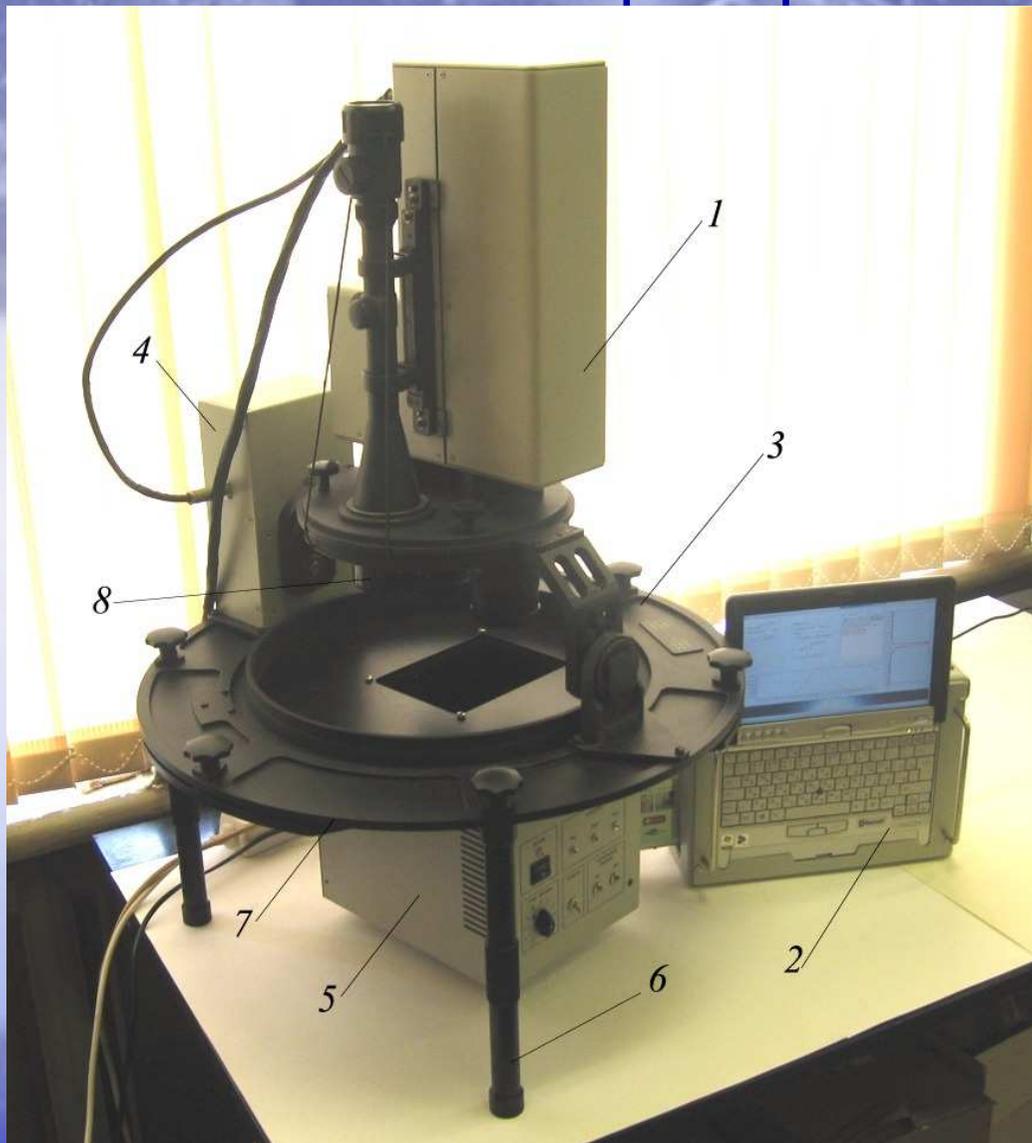
Компьютерная модель пространственно-временных вариаций свечений верхней атмосферы Земли и полета МКС



Летный образец СФК с имитатором космического эксперимента «Гидроксил-МКС»

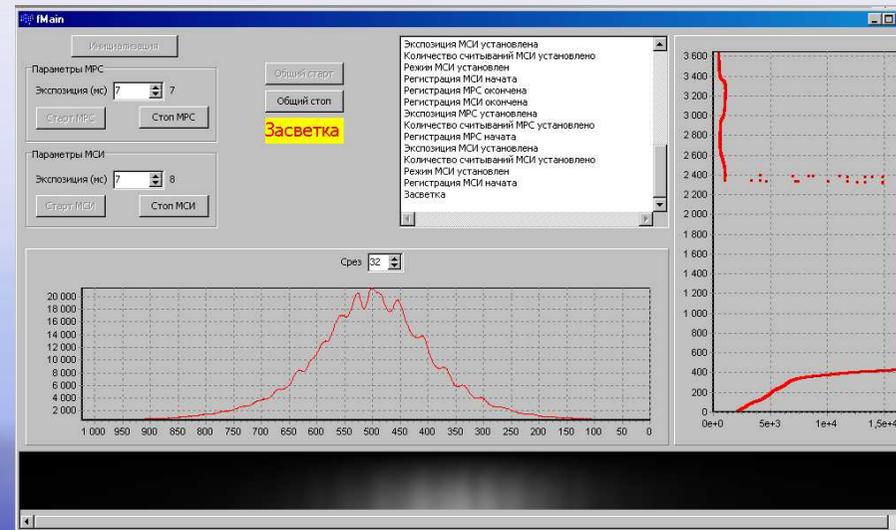
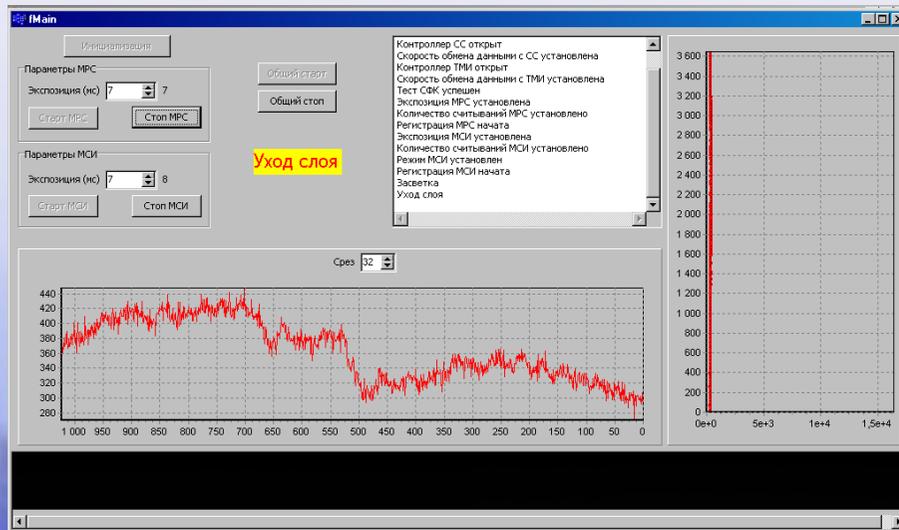
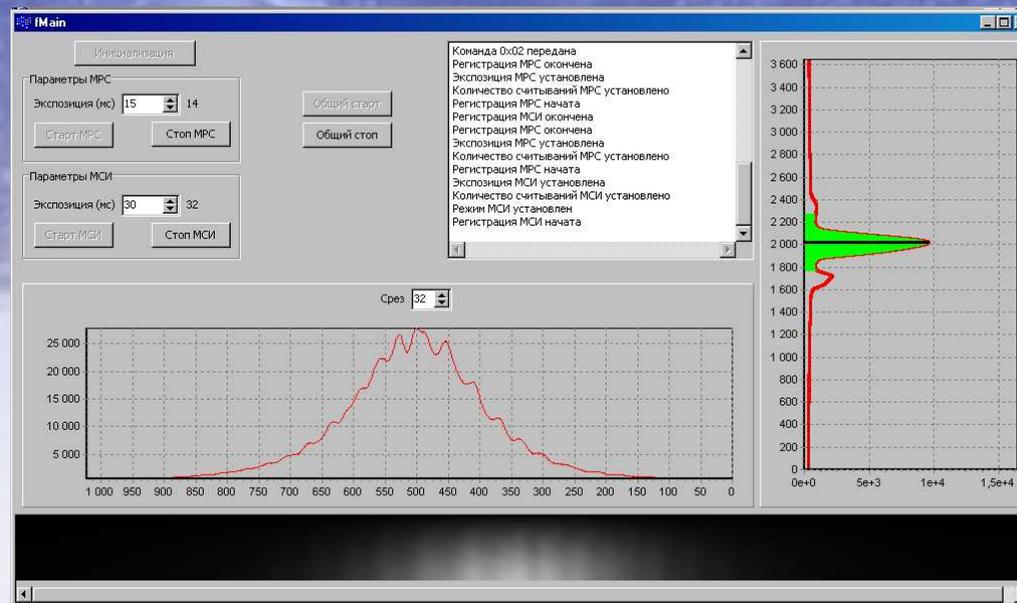


Контрольно-поверочная аппаратура для лабораторных испытаний



- 1 – блок оптический БО СФК;
- 2 – блок электроники БЭ СФК;
- 3 – кронштейн установочный СФК;
- 4 – система сканирования СС СФК;
- 5 – блок излучателей КПА-АИ-02;
- 6 – опоры установочные КПА-АИ-02
- 7 – пластина крепления блока излучателей к кронштейну установочному;
- 8 – насадки объективов БО СФК

Отработка основных режимов аппаратуры



Спасибо за внимание !!!

