

Спектрофотометрический комплекс для исследования свечений верхней атмосферы с борта международной космической станции

Беляев Б.И., Катковский Л.В., Синельников В.М.,

Сосенко В.А.,

Хвалец С.В.

НИИ Прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белгосуниверситета
г. Минск, Республика Беларусь

remsens@niks.by



Наименование работы и задачи исследований

Разработке и изготовлению 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»).

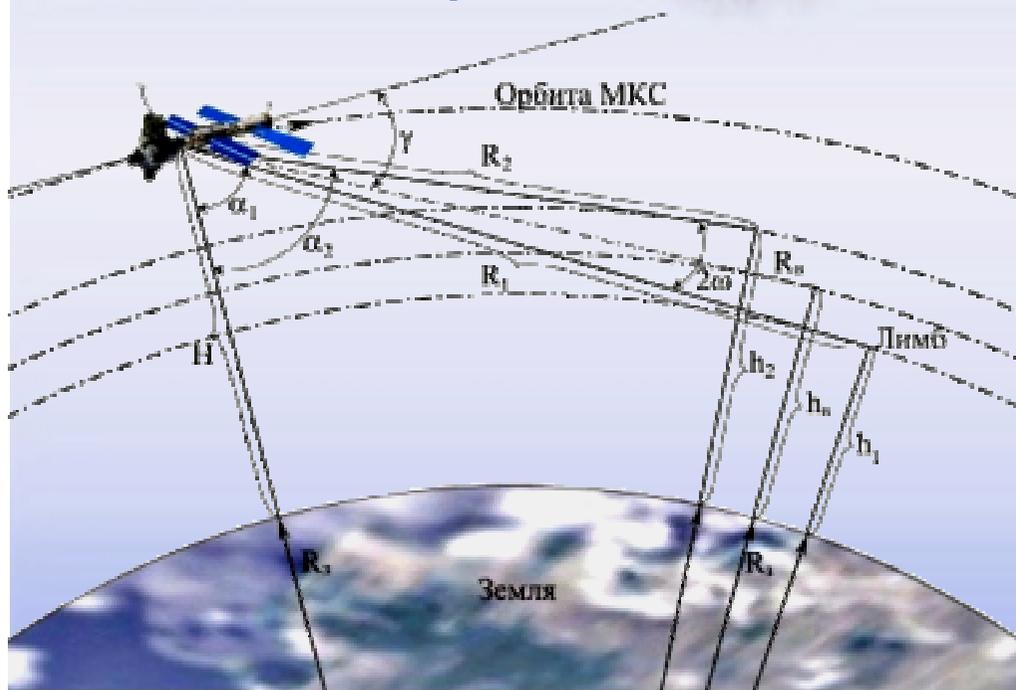
Разработчик и изготовитель НА – Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко Белорусского государственного университета, постановщик КЭ – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук, ответственный за реализацию КЭ – РКК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

Линии гидроксильных свечений и их интенсивность при наблюдении в лимб

Схема
проведения
космического
эксперимента
«Гидроксил»



Полоса, ОН(ν' , ν)	Линия	λ , нм	$\Delta\lambda$, нм	Интенсивность при наблюдении в лимб, Крэй
ОН(6, 2)	P_1	839,9	1,	4,5
	P_3	846,5	0,	3,5
ОН(7, 3)	P_1	888,5	8,	6,0
	P_3	895,8	0,	5,5
ОН(8, 4)	P_1	943,9	0,	7,5
	P_3	951,9	8,	7,0
	P_4	956,5	0,	17,5
ОН(3, 0)	P_1	987,2	0,	17,5
	P_2	991,5	0,	17,5
	P_3	996,3	0,	11,0
ОН(9, 5)	P_1	1008, 0	5, 0	10,5
	P_4	1022, 2	8, 0	7,0
ОН(4, 1)	P_1	1037, 3	5, 0	35,5

1)

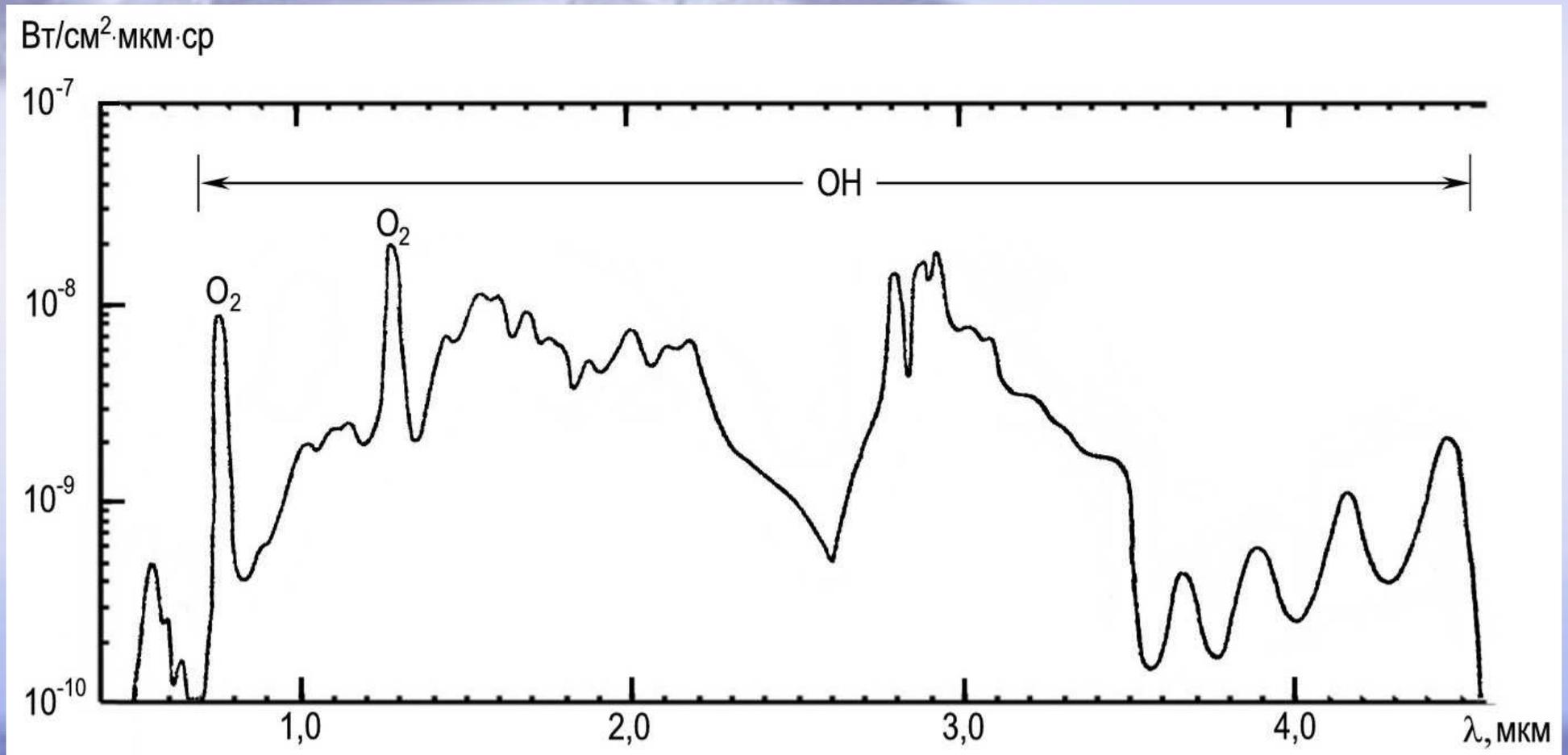
3

8

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	0,1-1,0
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

Средняя спектральная плотность энергетической яркости свечений газовых компонент атмосферы при условии наблюдения в надир с усреднением по $\Delta\lambda = 0,25$ мкм



Исходные данные для спектрофотометрического комплекса СФК по данным ТЗ

№	Параметр	Значение для ОН	Значение для кислорода О
1	Спектральный диапазон	840 - 1040 нм, полосы: ОН(v', v) ОН(6,2)-(839-850) ОН(3,0)-(947-1000) ОН(7,3)-(888-900) ОН(9,5)-(994-1025) ОН(8,4)-(940-965) ОН(4,1)-(1015-1040)	557,7 нм $O^1S = O^*$
2	Спектральное разрешение	0,5 нм; для разрешения вращательной структуры Р-ветвей полос не хуже 0,2 нм	0,5 нм
3	Интенсивность эмиссий	отдельных линий в полосе при наблюдении в направлении лимба в максимуме видимого слоя: 1 – 5 Крэлей	10 – 12 Крэлей при наблюдении в направлении лимба
4	Интенсивность фона (непрерывность спектра), регистрируемая в направлении лимба	до 300 – 400 Рэлей/нм	
5	Высота в атмосфере излучающего слоя	80 – 93 км	88 – 110 км, (85 – 105 км) $\Delta h = 10$ км
6	Пространственное разрешение по высоте (при наблюдении в лимб)	1 км (точность абсолютной привязки высоты не хуже 1 км)	1 км
7	Поле зрения вдоль щели, ориентированной вдоль радиуса Земли	4°	4°
8	Поле зрения поперек щели, ориентированной вдоль радиуса Земли	0,1°	0,1°
9	Ориентация оптической оси	17,5° вниз от местного горизонта, точность ориентации осей $\pm 1^\circ$	

•Спектрофотометрический комплекс (СФК)

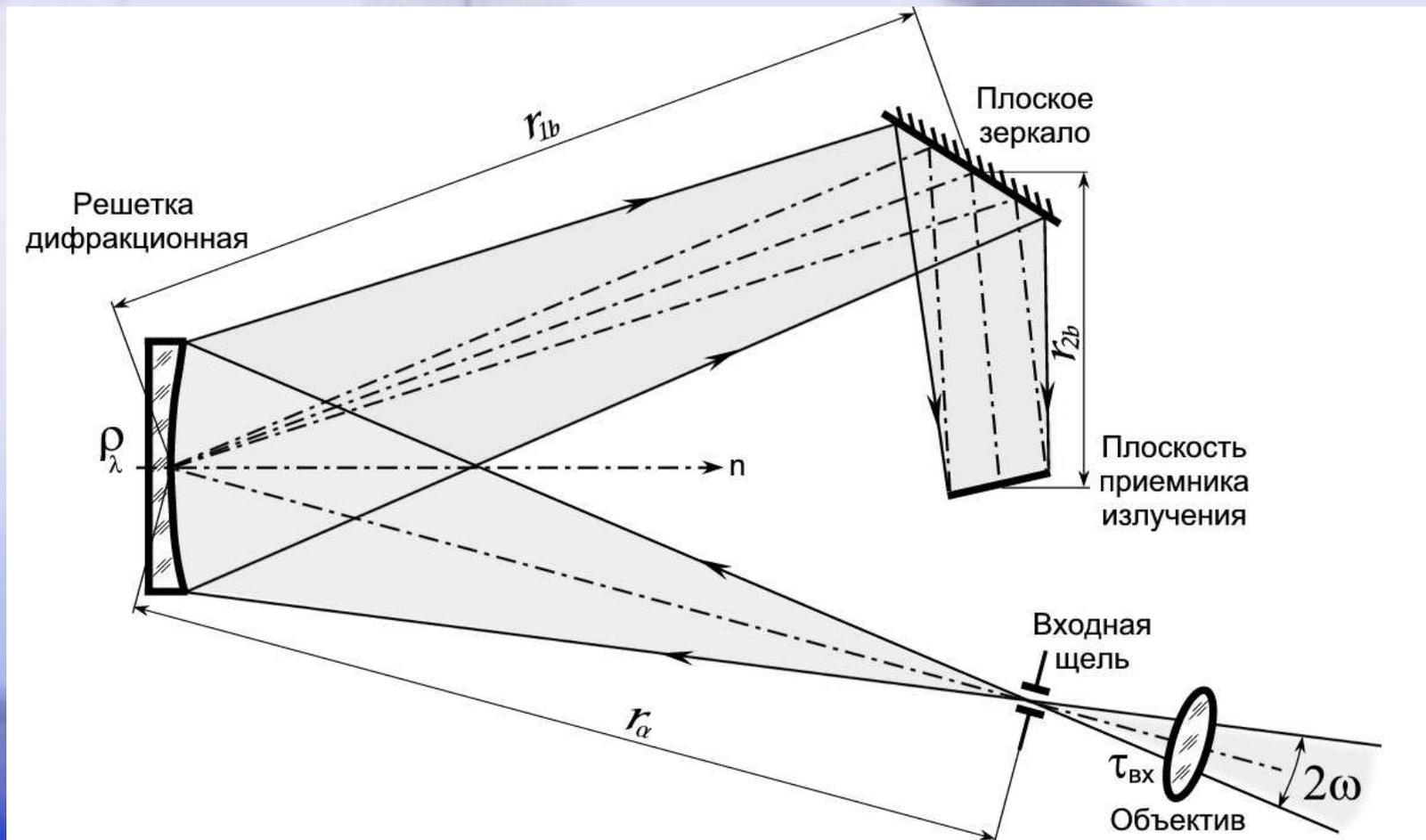
состоит из блока оптических датчиков (БО) и блока электроники (БЭ).

БО устанавливается на иллюминаторе РС МКС и состоит из:

модуля спектрального изображения МСИ,

модуля регистрации свечения МРС.

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	> 1,5 см, (2,5 см)
Фокусное расстояние входного объектива	>4,8 см
Относительное отверстие вх. об.	<0,5
Пространственное разрешение	<1 км
Спектральный диапазон	840 – 1040 нм
Спектральное разрешение	0,2 нм
Размер пикселя	24 мкм
Количество пикселей по вертикали	> 30 (128)
Количество пикселей по горизонтали	1000
Ширина входной щели	> 25мкм
Высота входной щели	>0,8 мм (3,2 мм)
Линейная дисперсия	0,12 мм/нм
Расстояние до источника	2000 км
Мгновенный угол поля зрения одного пикселя	$2,9 \cdot 10^{-2}$ град
Минимальный угол поля зрения по вертикали	0,86/3,0 град.
Средний КПД оптического тракта спектрометра	0,2
Средняя яркость отдельной линии в полосах ОН при наблюдении в лимб	1000 Рэлей
Средняя квантовая эффективность ПЗС матрицы	0,2
Средний темновой ток (при $t = - 25^{\circ}C$)	1 e^{-} (пиксель·с)
Средний шум считывания	6 e^{-} /пиксель
Средний ток полезного сигнала (входного потока излучения)	3,6 e^{-} (пиксель·с)
Время экспозиции для отношения сигнал/шум =3	13 с

Значения параметров МРС СФК для регистрации эмиссии атомарного кислорода

Параметр	Значение
Диаметр входного объектива	> 1,5 см, (2,5 см)
Фокусное расстояние входного объектива	>4,8 см
Относительное отверстие вх. об.	<0,5
Пространственное разрешение	<1 км
Размер пикселя	24 мкм
Количество пикселей по вертикали	> 30 (128)
Количество пикселей по горизонтали	4-8
Полуширина спектрального фильтра на длине волны 557,7 нм	0,5 нм
Средний КПД оптического тракта	0,8
Средняя яркость линии на длине волны 557,7 нм при наблюдении в лимб	10 КРэлея
Квантовая эффективность ПЗС-матрицы на длине волны 557,7 нм	0,3
Средний темновой ток (при $t = -25^{\circ}\text{C}$)	1 e^- / (пиксель·с)
Средний шум считывания	6 e^- /пиксель
Средний ток полезного сигнала (входного потока излучения)	216 e^- / (пиксель·с)
Время экспозиции для отношения сигнал/шум =10	0,6 с

Блок оптический СФК

(экспериментальный образец)



Блок электроники СФК

(экспериментальный образец)



Блоки оптический и электроники СФК



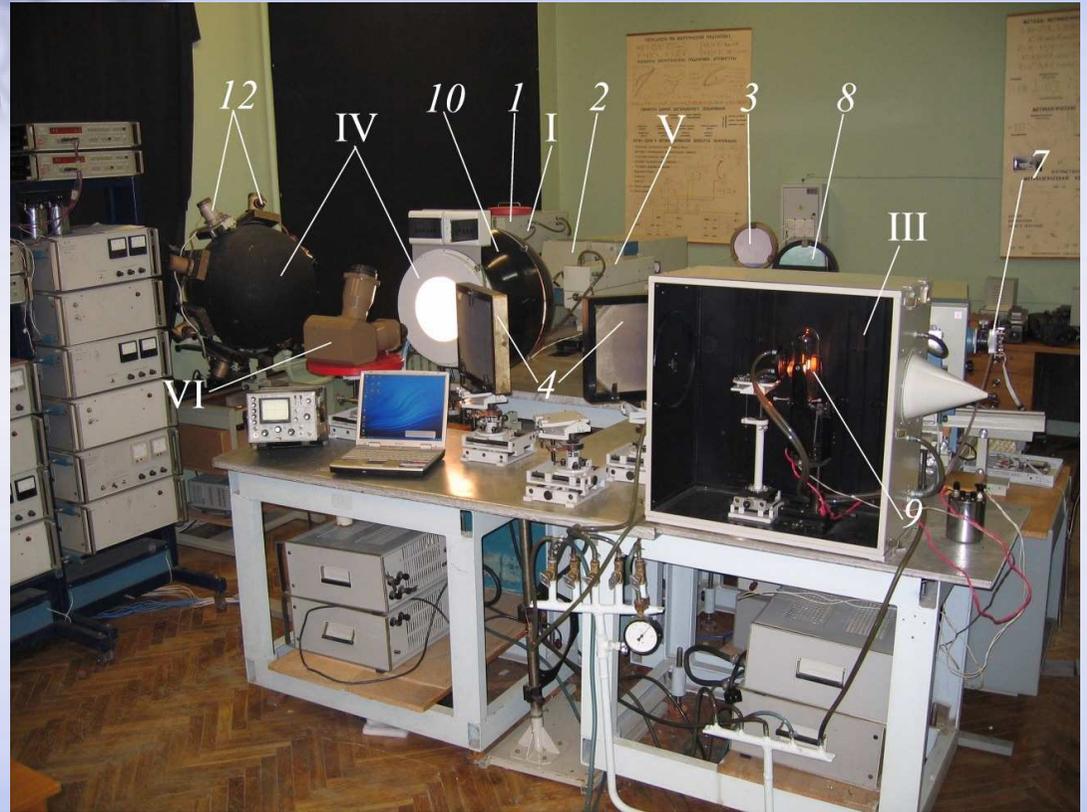
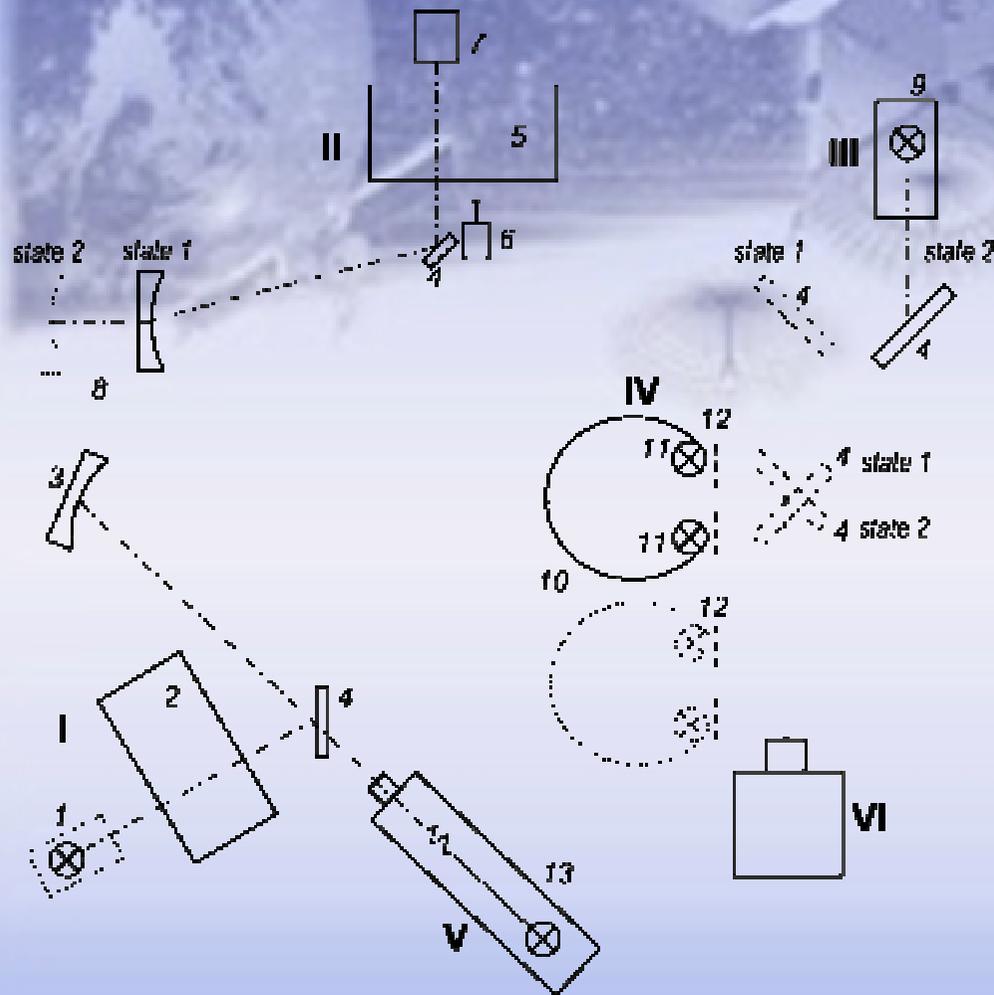
Блок оптический СФК
со снятыми крышками



Контрольно-поверочная аппаратура для лабораторных испытаний

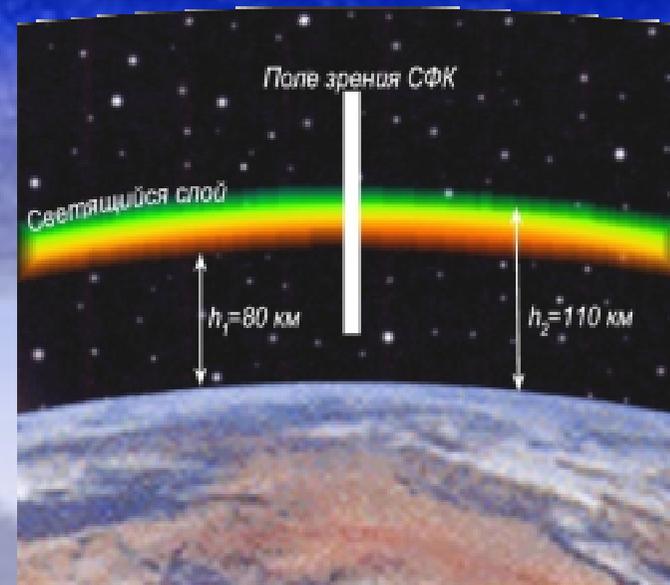
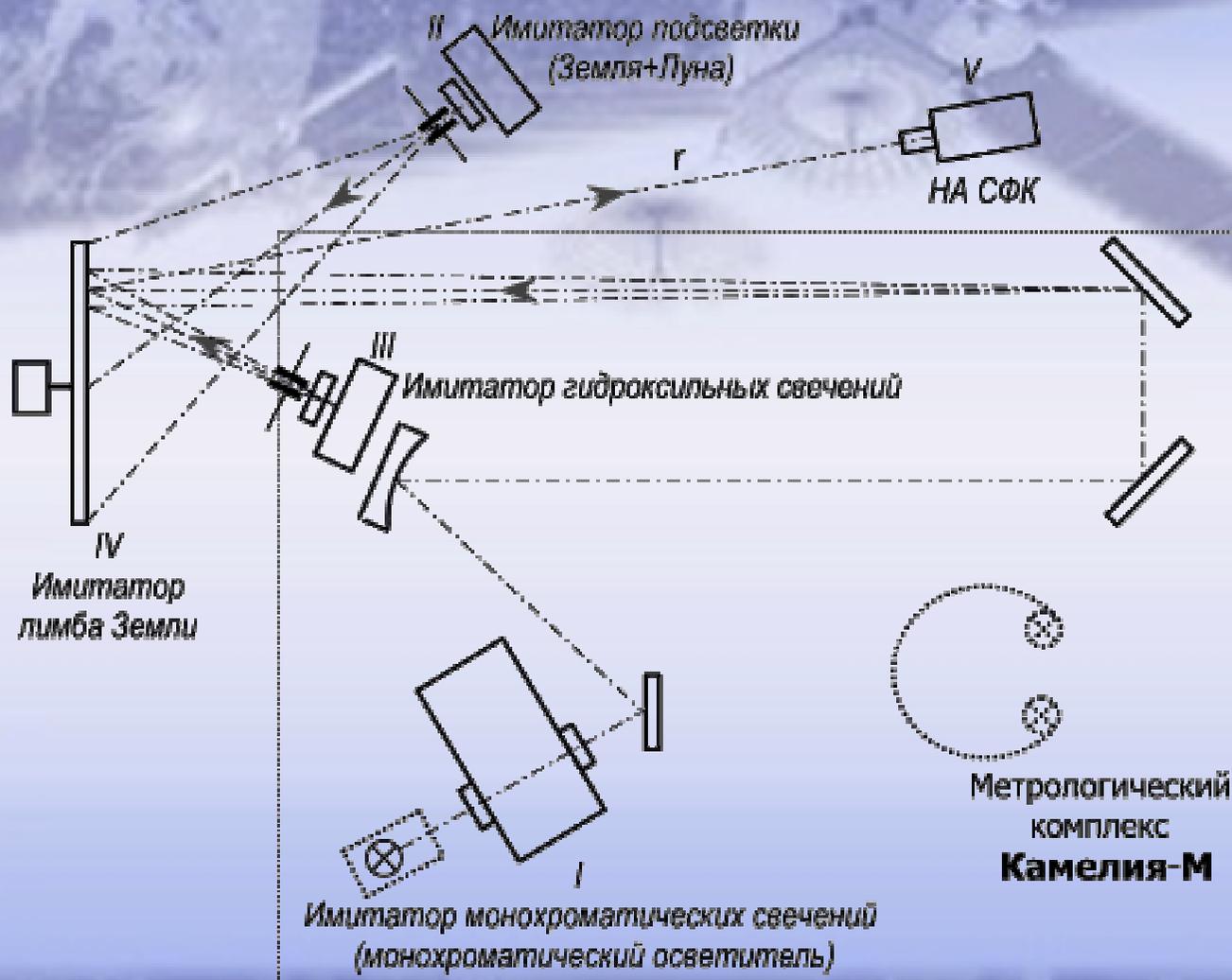


Функциональная схема и общий вид метрологического комплекса «Камелия-М»

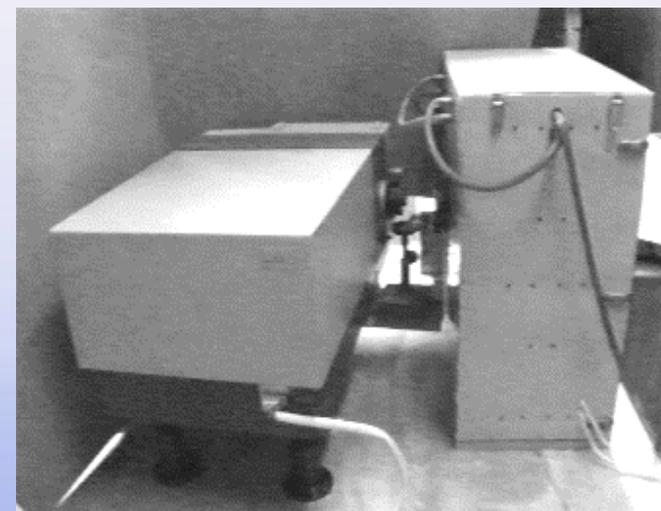


- I** – монохроматический осветитель (1 – лампа ТРУ 1100-2350, 2 – монохроматор МДР-23, 3 – комиматорное зеркало, 4 – плоские поворотные зеркала);
- II** – компаратор спектральной плотности энергетической яркости (5 – монохроматор МДР-23, 6 – модулятор, 7 – блок приемников, 8 – сферическое зеркало);
- 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

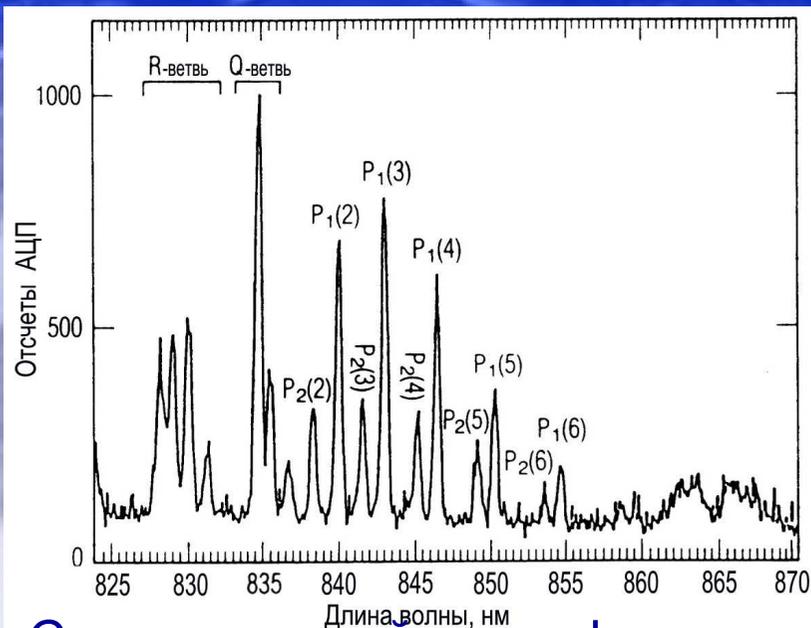
Функциональная схема блоков имитаторов, совмещенных с комплексом «Камелия-М»



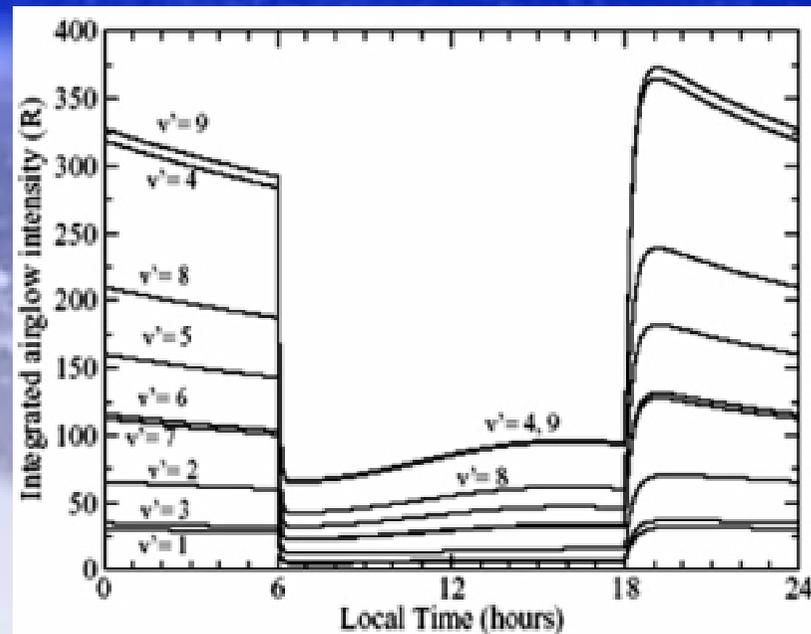
Имитатор Лимба Земли



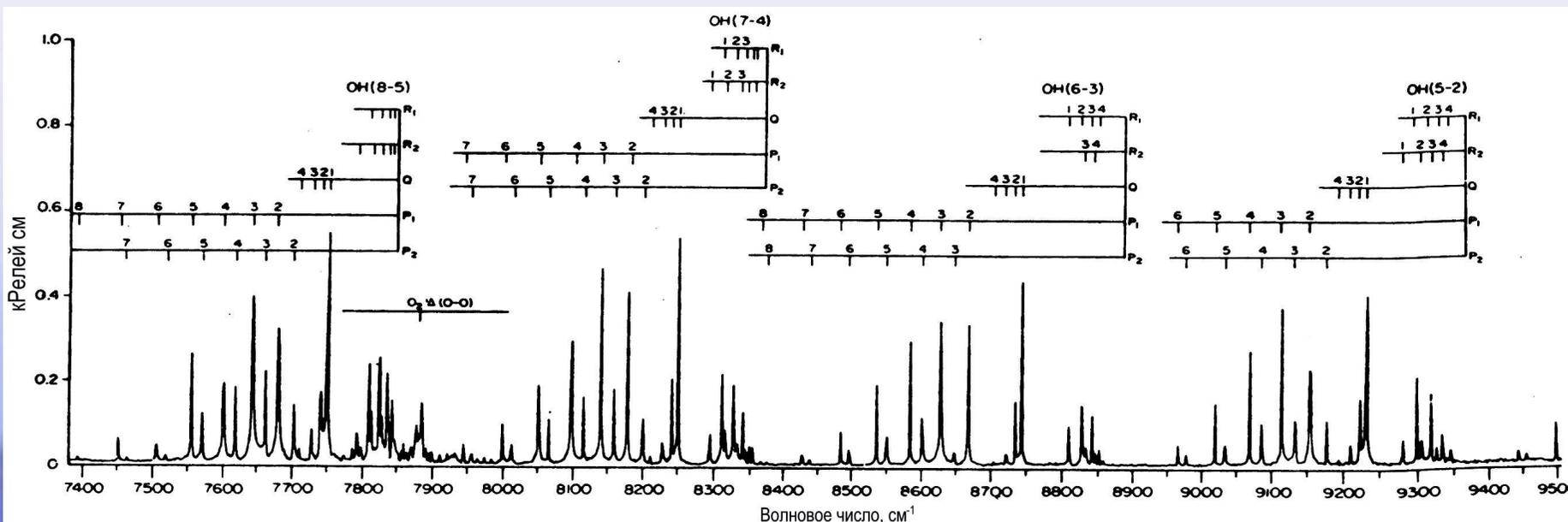
Общий вид монохроматического осветителя



Спектр верхней атмосферы в диапазоне спектра 825 – 870 нм

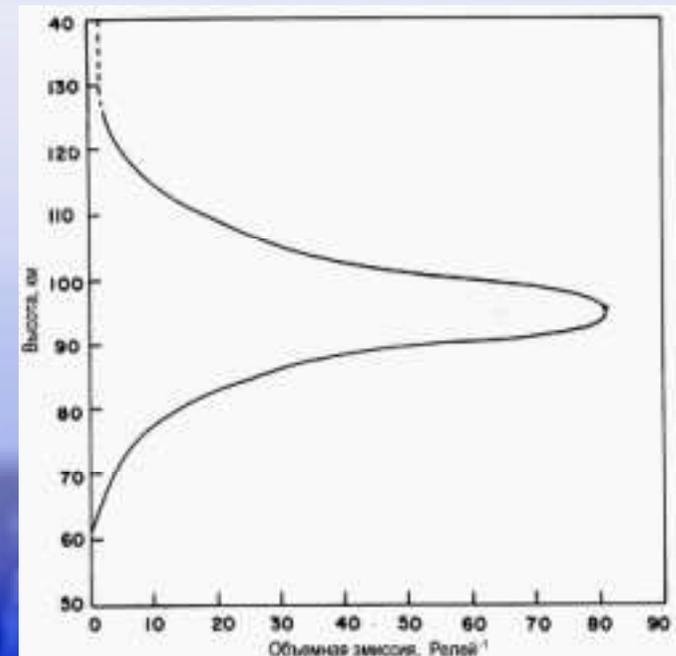
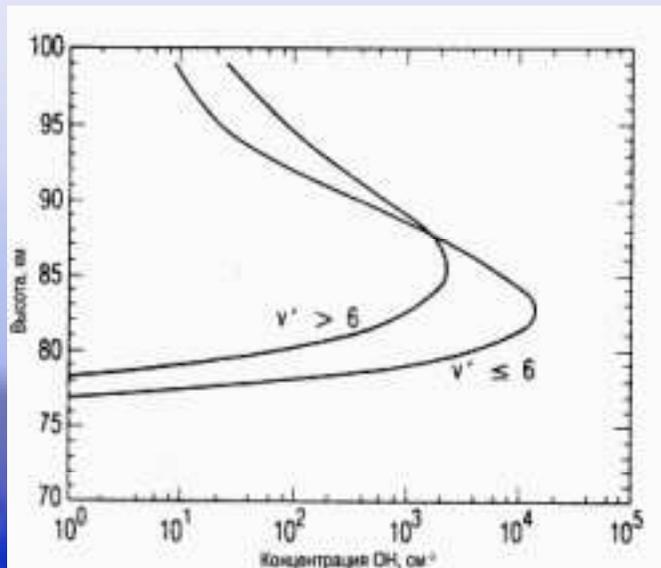
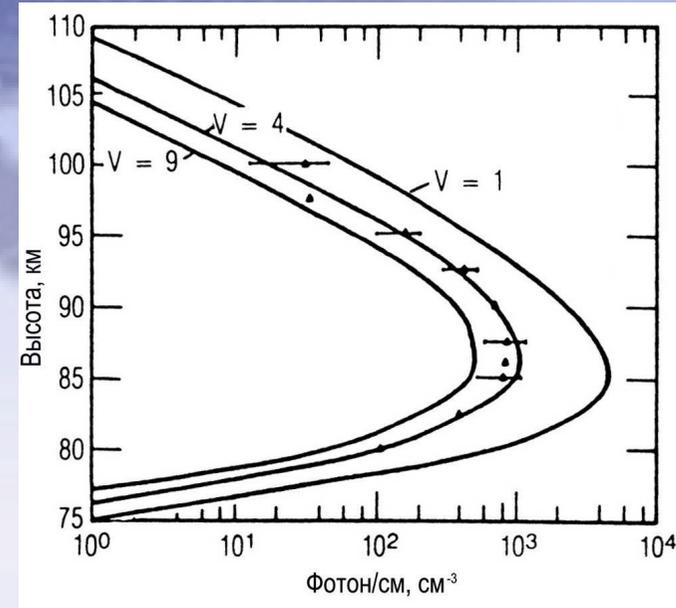
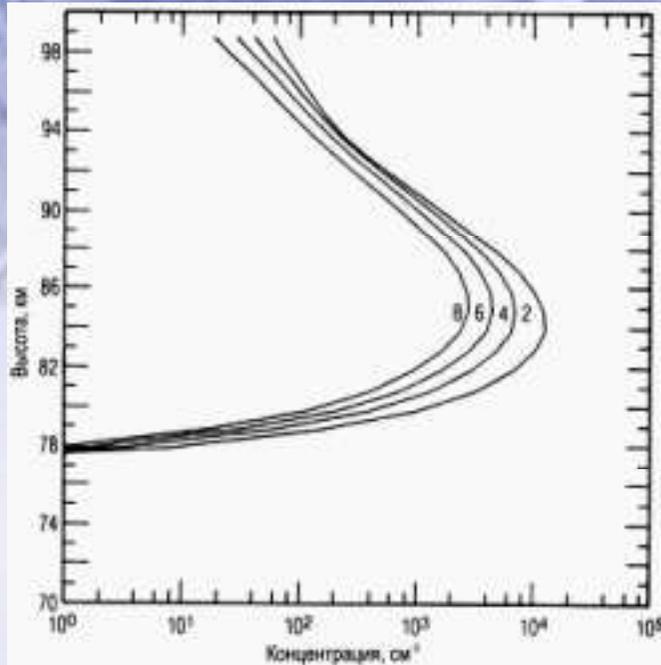


Суточные вариации свечений различных полос гидроксила для теоретической модели дезактивации возбуждения уровней ОН, по оси x – локальное время, по оси y – интегральная интенсивность свечения в Релеях

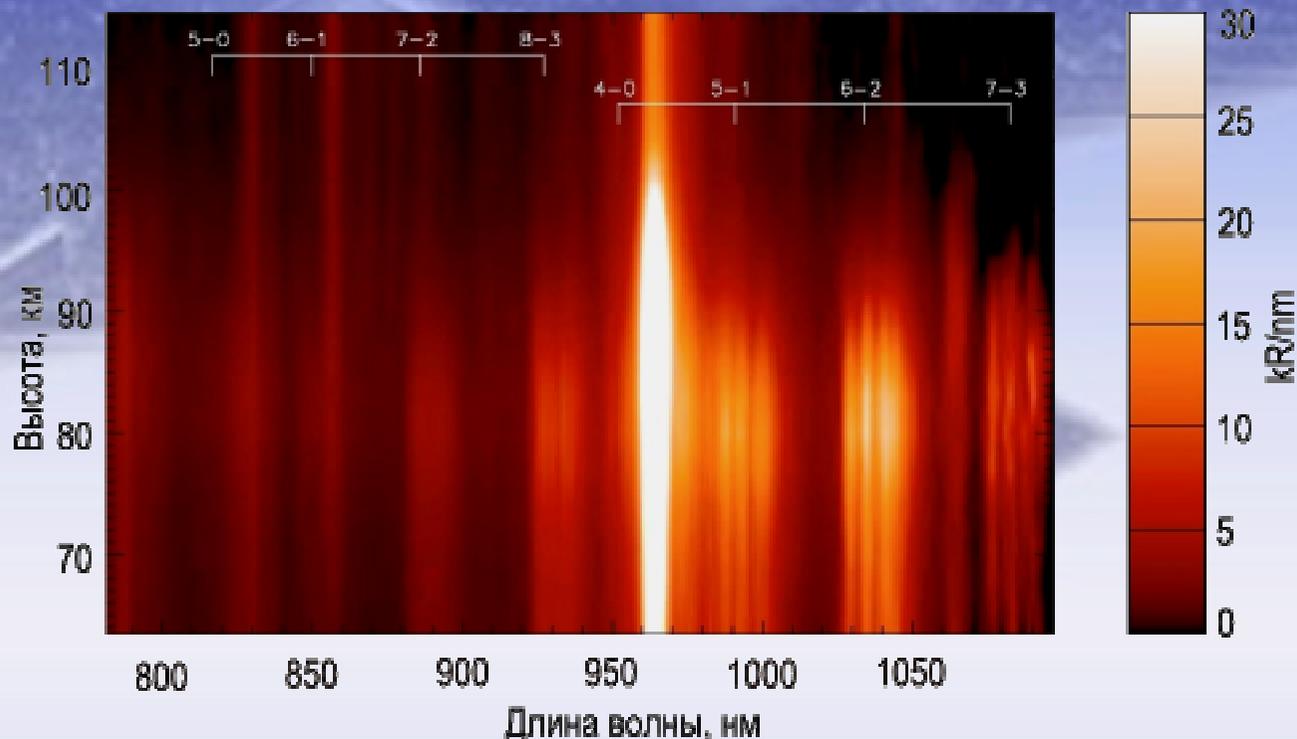


Спектр гидроксила – характер изменения выходного сигнала вдоль строки приемной ПЗС матрицы МСИ

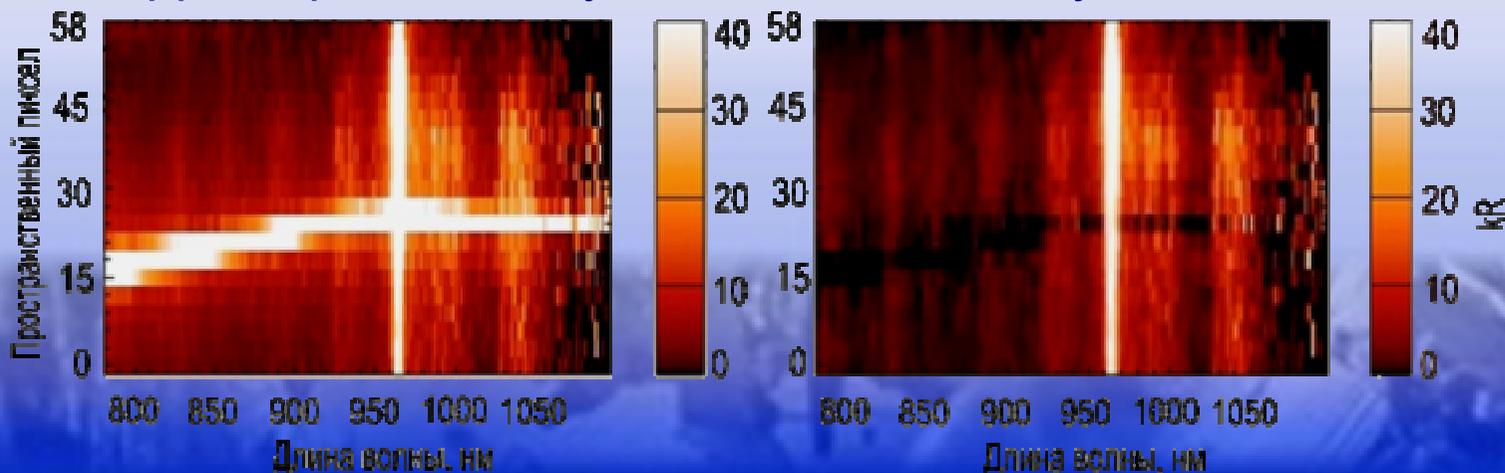
Типичные высотные распределения объемной эмиссии и концентраций возбужденных молекул гидроксила OH и атомарного кислорода



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



Спасибо за внимание !!!

