

Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли

Ф.С. Завелевич¹, Ю.М. Головин¹, А.В. Десятов¹, Ю.П. Мацицкий¹, А.Г. Никулин¹,
А.С. Романовский², Г.Г. Горбунов³, А.К. Городецкий⁴, А.В. Воронкевич⁵

¹ФГУП "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша",
125438, Москва, Онежская ул., д. 8
E-mail: kerc@elnet.msk.ru

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5
E-mail: postmaster@interd.bmgtu.msk.su

³Всероссийский научный центр "Государственный оптический институт",
199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 12
E-mail: lider@spb.su

⁴Институт космических исследований РАН,
117997, Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: gora@iki.rssi.ru

⁵ФГУП "Научно-исследовательский институт электромеханики"
143500, Московская область, г. Истра, ул. Панфилова, д. 10

Представлены назначение, устройство и основные характеристики инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2, предназначенного для измерений уходящего излучения системы "атмосфера-поверхность" с борта КК "Метеор-М". Спектральный диапазон работы прибора $665\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ ($5\text{--}15\text{ мкм}$), спектральное разрешение $0,5\text{ см}^{-1}$, порог обнаружения (при длине волны 13 мкм) – $0,5 \times 10^{-4}\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$, погрешность измерения излучения в терминах радиационной температуры $-0,5\text{ К}$, пространственное разрешение 35 км (при высоте орбиты 830 км), время получения спектра в одной точке – $0,6\text{ с}$, информационный поток – 650 Кбит/с , масса прибора – 50 кг , энергопотребление – 50 Вт . Получаемая информация обеспечивает восстановление профилей температуры с погрешностью 1 К , влажности и содержания озона 10% , температуры водной поверхности $0,5\text{ К}$, суши 1 К . Кроме того могут быть получены данные для определения общего содержания CH_4 , N_2O и других малых газовых составляющих атмосферы.

Назначение прибора

Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 предназначен для измерения спектров уходящего излучения системы "атмосфера-поверхность", необходимых для получения следующих видов информации:

- профилей температуры в тропосфере и нижней стратосфере с погрешностью $1\text{--}1,5\text{ К}$, вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере;
- профилей влажности в тропосфере с погрешностью 10% (в терминах относительной влажности), вертикальным разрешением $1\text{--}2\text{ км}$ в нижней тропосфере;
- общего содержания озона с погрешностью не хуже 5% и вертикального профиля содержания O_3 в озоновом слое с погрешностью 10% (содержание O_3 в 2-х или 3-х слоях атмосферы);
- температуры подстилающей поверхности с погрешностью $\leq 0,5\text{ К}$ (вода) и $\leq 1\text{ К}$ (суша);
- доли покрытия облачностью и давления на верхней границе облачности.

Кроме этого могут быть получены данные для определения общего содержания малых газовых составляющих атмосферы: CH_4 , N_2O и др.

Указанные погрешности восстановления метеопараметров приведены для условий безоблачной атмосферы.

Результаты моделирования решения задачи по определению температурного профиля $T(p)$ в атмосфере, проведенного в частности в [1], с полинейным расчетом функции пропускания CO_2 в полосе поглоще-

ния 15 мкм, показывают, что для восстановления T(p) с погрешностью 1 К необходимо иметь спектральное разрешение не хуже 0,5–0,7 см⁻¹ при уровне шума в измеренном спектре 0,1 мВт/(м²·ср·см⁻¹).

Состав и технические характеристики прибора ИКФС-2

Расположение фурье-спектрометра ИКФС-2 на КА "Метеор-М" представлено на Рис.1. Прибор состоит из двух блоков - оптико-механического (ОМБ) и блока обработки, управления и питания (Электронный модуль (МЭ)). МЭ расположен в герметичном отсеке, ОМБ устанавливается снаружи на обращённой в надир поверхности КА и работает в открытом космосе.

ОМБ включает в себя три модуля:

- 1) модуль интерферометра (МИ), в котором происходит измерение спектральной яркости объекта;
- 2) модуль сканера (МС), направляющий поле зрения прибора в требуемую точку и содержащий эталонный источник ИК-излучения для периодической калибровки прибора;
- 3) радиационный холодильник (РХ) для охлаждения приёмника излучения.

МЭ предназначен для управления работой прибора, предварительной обработки полученных прибором данных, включая преобразование измеренных интерферограмм в спектр излучения, формирования пакетов научной и служебной информации и передачи их в память КА, приема от КА команд и их выполнения.

Основные технические характеристики фурье-спектрометра ИКФС-2 приведены в таблице 1.

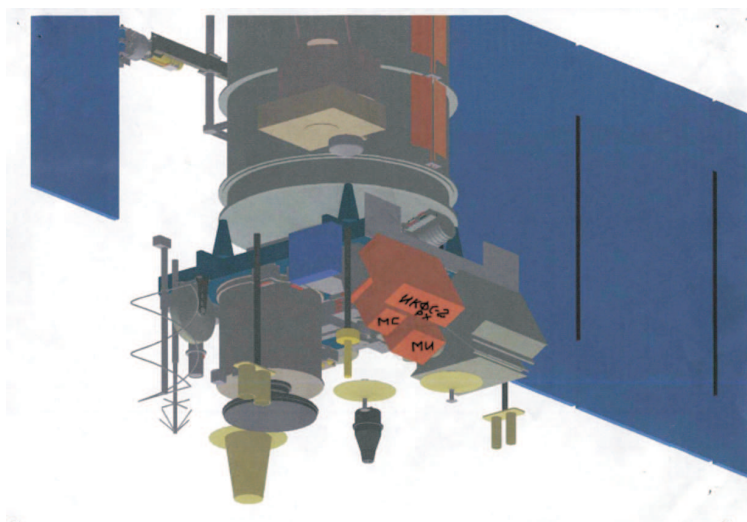


Рис. 1. Расположение фурье-спектрометра ИКФС-2 на КА "Метеор-М"

Таблица 1. Основные технические характеристики фурье-спектрометра ИКФС-2

Рабочий спектральный диапазон	не менее 5-15 мкм ($\nu = 2000 \dots 665 \text{ см}^{-1}$)
Спектральное разрешение (ширина изолированной спектральной линии на половине высоты линии) с учетом аподизации	не более 0,5 см ⁻¹
Интервал дискретизации	не более 0,25 см ⁻¹
Порог обнаружения /NESR/ [Вт×м ⁻² ср ⁻¹ см] не более:	
- при длине волны 6 мкм	0,5×10 ⁻⁴
- при длине волны 13 мкм	0,5×10 ⁻⁴
- при длине волны 15 мкм	1×10 ⁻⁴
Погрешность измерения спектральной яркости объекта в терминах эквивалентной температуры при длине волны 11...12 мкм и при температуре объекта 280...300 К	0,5 К

Угловой диаметр поля зрения по уровню 0,5, чему соответствует пространственное разрешение (в надире)	не более 40 мрад; не более 35 км
Периодичность получения интерферограммы	≤ 0,6 с
Информативность	не более 650 кбит/с
Масса прибора	не более 50 кг
Потребление: - среднее за виток - в режиме дегазации (4 суток за 6 месяцев)	не более 50 Вт не более 100 Вт

Модуль интерферометра

Основной частью прибора является модуль интерферометра (МИ). Он включает в себя интерферометр типа "двойной маятник" и одноканальный радиометр.

Устройство МИ, соединённого с радиационным холодильником (РХ), представлено на Рис. 2.

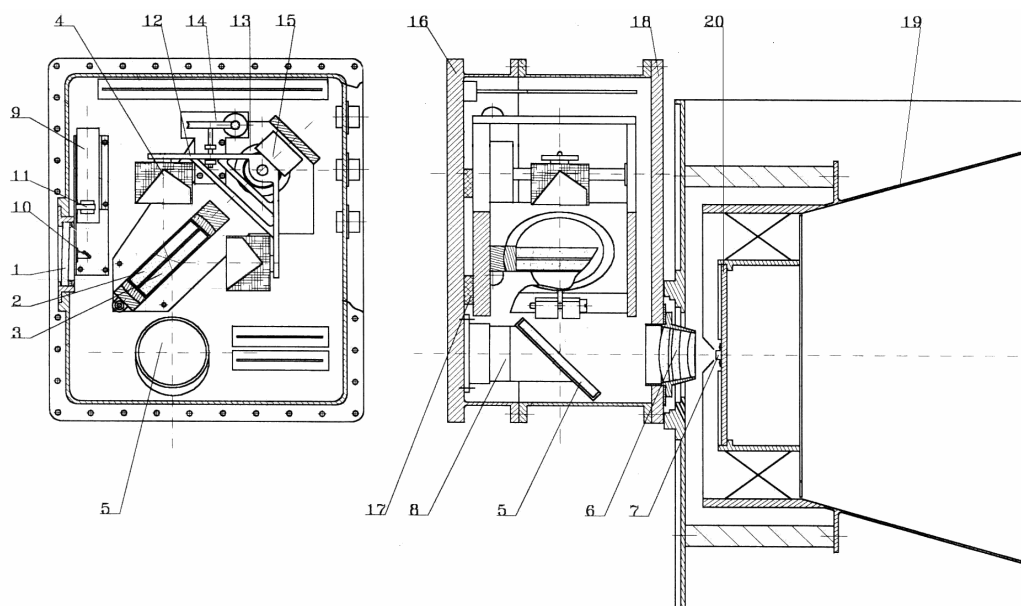


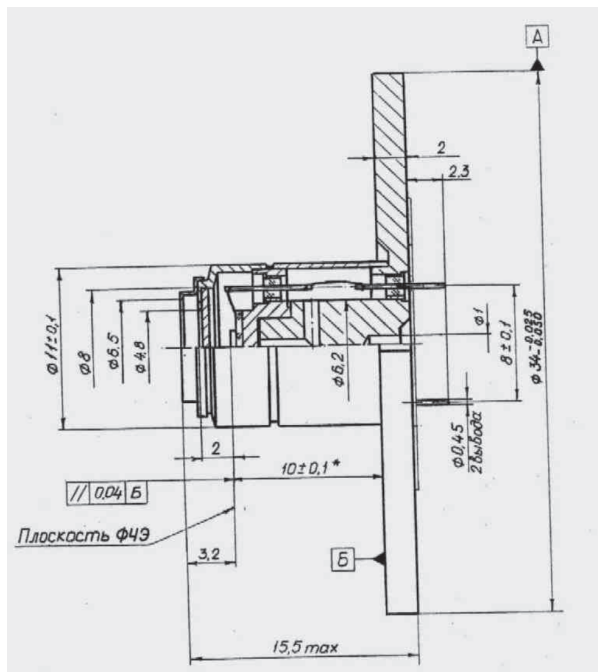
Рис. 2. Модуль интерферометра с радиационным холодильником

Исследуемое излучение проходит через входное окно 1 и попадает на светоделитель, состоящий из светоделительной пластины 2 и компенсатора 3, где оно расщепляется на два потока, идущих к двум угловым отражателям (триэдрам) 4. После вторичного прохождения через светоделитель эти потоки интерферируют и попадают через плоское зеркало 5 на объектив 6, который фокусирует излучение на приемник 7.

В качестве источника света для референтного канала используется лазер 9. Свет от лазера зеркалом 10 направляется на светоделитель и затем, после отражения на триэдрах и вторичного прохождения светоделителя, направляется через зеркало, аналогичное 10 и расположенное над ним, на фотоприемник 11. (Указанные зеркала расположены вне пучка измеряемого ИК излучения).

Триэдры закреплены на коромысле 12 и качаются с постоянной скоростью вокруг своей оси с помощью привода 13. (Полный размах 5,8°). Коромысло снабжено противовесом 15. В нерабочем состоянии коромысло фиксируется многоходовым арретиром 14.

В качестве приемника ИК-излучения применяется фотосопротивление из CdHgTe. Приёмник установлен в металлическом корпусе и закрыт окном из германия с просветлением обеих поверхностей для длины волны 12...15 мкм. Размер приёмника находится из заданного размера поля зрения (35 км) и высоты орбиты (830 км): $d = \varphi \cdot f = (35 \text{ км} / 830 \text{ км}) \cdot 44.3 \text{ мм} \approx 2 \text{ мм}$. Основные размеры фотоприемного устройства и его технические характеристики представлены на Рис. 3.



$\lambda_{\text{max}} = 13 \text{ мкм};$
 $D^*_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$
 (при $f = 10 \text{ кГц}$ и $T = 80 \text{ К}$)
 $\Delta\lambda = 6 - 15,5 \text{ мкм}$ по уровню 0,5
 Тепловыделение - 20 мВт

Рис. 3. Фотоприемное устройство

Для поддержания температуры основных элементов модуля в пределах $\pm 0,2 \text{ К}$ от выбранной средней температуры в течение всего времени функционирования служит система терморегулирования (СТР). Система терморегулирования включает в себя 5 нагревателей, каждый мощностью до 2 Вт. Сброс тепла, выделяемого внутри модуля, осуществляется, во-первых, радиационным путём через некоторые поверхности, имеющие покрытие с малым отношением A_s/ϵ (тонкопленочное покрытие типа ОСО-С) и, во-вторых, на корпус аппарата через кронштейн крепления с тепловым сопротивлением порядка 0,1 К/Вт.

Модуль сканера

Модуль сканера (МС) предназначен для наведения поля зрения прибора на Землю поперек трассы спутника с целью равномерного покрытия полосы наблюдения точками наблюдения, а также для наведения при калибровке прибора его поля зрения на космос и на эталонный ИК-излучатель, встроенный в модуль.

Шаг смещения поля зрения вдоль линии сканирования зависит от ширины полосы обзора и изменяется от 110 км при ширине полосы 2500 км до 65 км при ширине 1000 км.

МС устанавливается перед входным окном МИ и соединяется с МИ. Схема модуля приведена на Рис. 4.

На шасси 2 с одной стороны установлен узел вращающегося зеркала (позиции 3, 4, 5) и эталонный излучатель 8. С другой стороны на шасси установлен узел привода (позиции 9, 10, 11) и датчик углового положения (позиции 6, 7).

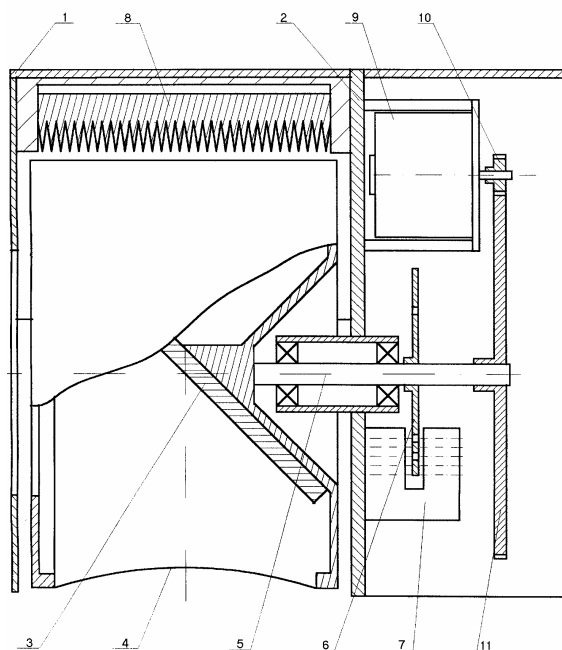


Рис. 4. Модуль сканера

Зеркало 3 и оболочка 4 с отверстием для входа излучения вращаются совместно на оси 5, причем, пока зеркало не наведено на эталонный излучатель 8, последний оказывается закрытым оболочкой 4. Отраженное от зеркала излучение попадает во входное окно МИ через отверстие диаметром 80 мм.

Узел привода содержит шаговый двигатель 9 VSS 57.200.1.2 HV и редуктор с коэффициентом редукции 1:6. При шаге двигателя в $1,8^\circ$ и длительности импульса 2 мс скорость поворота зеркала составляет 150° в секунду. Для измерения положения сканера используется датчик угловых положений (энкодер). Шторка 6 и блок сдвоенных оптопар 7 служит для определения исходного положения зеркала сканера.

Максимальный угловой шаг поворота зеркала при сканировании (вблизи надира) составляет $8,5^\circ$, чему соответствует длительность поворота около 0,06 с и смещение поля зрения прибора по поверхности Земли в 110 км (обеспечение т.н. одноградусной сетки наблюдений). Величина шага и число шагов вдоль линии сканирования могут изменяться по команде с Земли. Надежность работы привода обеспечивается использованием двух идентичных электронных плат со схемами управления двигателями.

Энергетическая калибровка на борту КА заключается в измерении интерферограмм (и вычислении спектров) излучения бортового модуля калибровки и "холодного" космоса. Бортовой модуль калибровки (позиция 8 Рис. 4) создан ФГУП "Центр Келдыша" при активной технической поддержке "НПЦ оперативного мониторинга Земли" (руководитель работ Л.А. Пахомов). Он представляет собой модель черного тела в виде цилиндра небольшой толщины $\sim 20 \div 25$ мм с поверхностью с кольцевыми углублениями определенного профиля. Теплоприемник представляет собой медный цилиндр. Его назначение сгладить неравномерности по температуре при нагревании. В качестве датчиков температуры используются медные термометры сопротивления ТМ 344. Погрешность измерения 0,1 градуса. Нагреватель выполнен в виде магнетитовой дорожки на полимерной подложке. Толщина дорожки примерно 30 мкм, ширина 0,5 мм. Сопротивление нагревателя составляет 140 Ом, максимальная мощность 5 Вт при напряжении питания 27 В. Температура излучателя поддерживается постоянной на уровне $33,5 \pm 0,2$ °С.

Конструкция модели черного тела (профиль колец) выполнена таким образом, чтобы минимизировать отражение от острых наружных и внутренних кольцевых кромок, что позволило получить степень черноты $> 0,995$. Тепловизионное изображение черного тела при $t = 33,5$ °С представлено на Рис. 5.

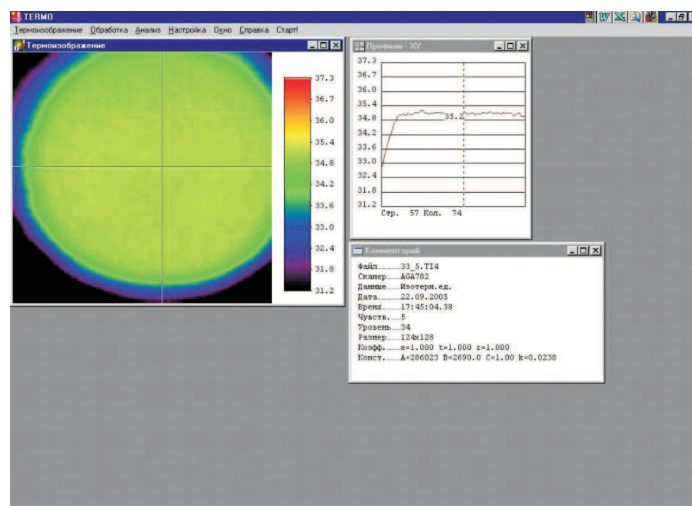


Рис. 5. Тепловизионное изображение черного тела при $t = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Модуль обработки, управления и питания (модуль электронный, МЭ)

Структурная схема МЭ фурье-спектрометра представлена на Рис. 6.

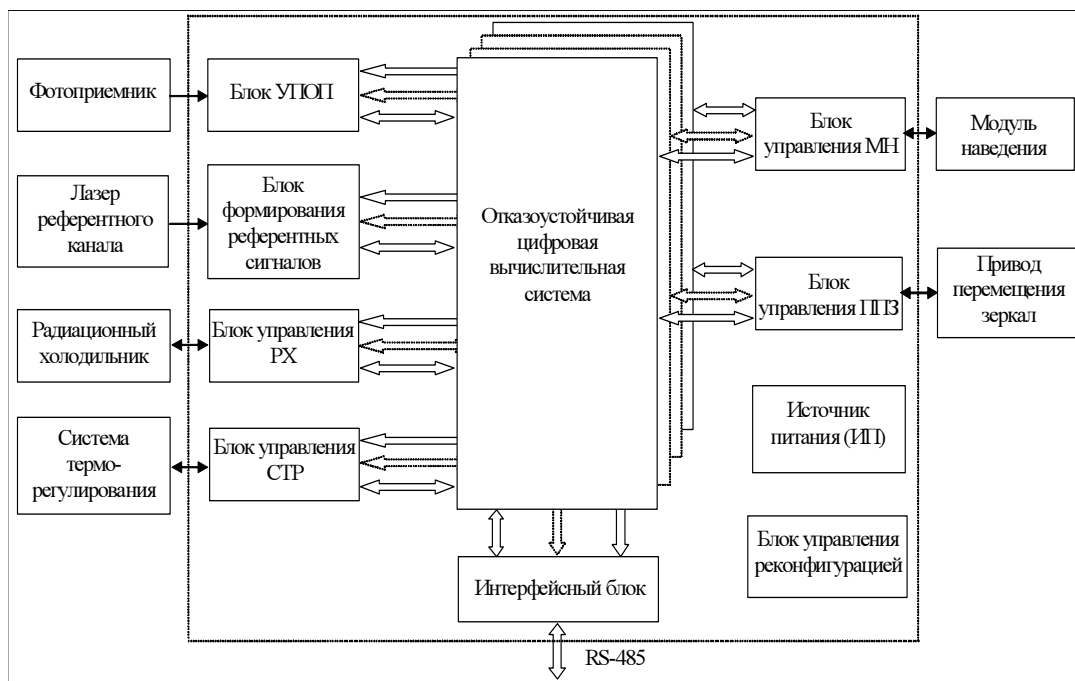


Рис. 6. Структурная схема МЭ фурье-спектрометра ИКФС-2

Для достижения заданной вероятности безотказной работы равной 0,9985 цифровая вычислительная система (ЦВС) состоит из 4 процессорных модулей, один из которых активно функционирует, а остальные находятся в холодном резерве.

Каждый процессорный модуль состоит из цифрового сигнального процессора (ЦСП), быстродействующей статической памяти, электрически перепрограммируемой постоянной памяти и контроллера периферийных устройств. Статическая память (SRAM) предназначена для запоминания как самой интерферограммы, поступающей из устройств предварительной обработки и преобразования (УПОП) в каждом цикле работы фурье-спектрометра, так и результатов ее обработки. Объем SRAM, необходимый для организации

конвейерного режима работы (хранение, обработка, пересылка в накопитель большой емкости), составляет 128 Кбайт.

Электрически перепрограммируемая постоянная память (FLASH) предназначена для хранения основной программы работы ЦВС, загрузчика, а также необходимых для работы программы констант. Ее объем не превышает 128 Кбайт.

Контроллер периферийных устройств обеспечивает связь сигнального процессора со всеми резервируемыми устройствами и модулями ЦВС: УПОП, ППЗ, модулем наведения, системой терморегулирования, интерфейсными модулями, модулем реконфигурации.

В связи с тем, что сброс информации с КА на Землю осуществляется 2 раза в сутки, на борту КА имеется накопитель достаточно большой емкости, позволяющий накапливать интерферограммы, полученные за 12 часов работы ФС. Объем интерферометрической информации, полученной за 12 часов, составляет порядка 1,5 Гбайт.

Результаты испытаний фурье-спектрометра ИКФС-2

Совместными усилиями ФГУП "Центр Келдыша", МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИКИ РАН, ГОИ создан экспериментальный образец фурье-спектрометра, который в настоящее время проходит испытания. Некоторые из результатов испытаний приведены ниже.

На Рис. 7 в качестве примера приведен один из спектров, полученных с помощью фурье-спектрометра. На спектре отчетливо наблюдаются полосы присутствующих в воздухе H_2O и CO_2 .

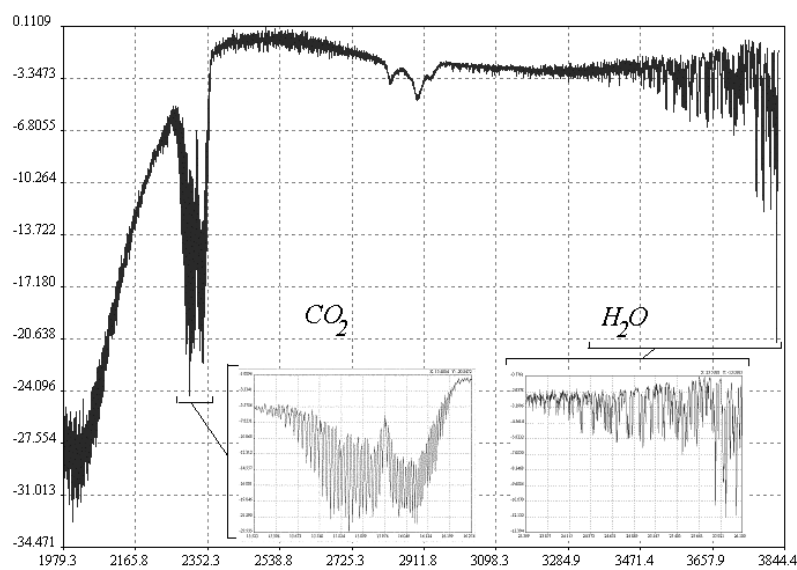


Рис. 7. Спектр (преобразование Фурье интерферограммы)

Экспериментально установлено, что спектральное разрешение не превышает $0,5 \text{ см}^{-1}$; суммарное время разгона и торможения маятника $\leq 0,1 \text{ с}$; отклонение скорости маятника от среднего значения на рабочем участке $\leq 0,6 \%$; отклонение измеренного положения центра линий от данных HITRAN 2000 не превышает $0,15 \text{ см}^{-1}$.

Литература

1. Головки В.А., Пахомов Л.А. Некоторые вопросы совершенствования методов температурного зондирования атмосферы со спутников. // В сб. "Изучение природных ресурсов и окружающей среды космическими средствами". Л. Гидрометеиздат, 1984, с. 31–39.