



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ - ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИМЕНИ М.В. КЕЛДЫША»

## Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (1), ФНПЦ ОАО «КМЗ» (2), НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана (3)

### Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

Завелевич Ф.С. (1), Десятов А.В. (1), Головин Ю.М. (1), Мацицкий Ю.П. (1),  
Никулин А.Г. (1), Козлов Д.А. (1), Монахов Д.О. (1), Болмосов И.В. (1),  
Архипов С.А. (2), Целиков В.А. (2), Романовский А.С. (3)

*Секция С «Вопросы создания и использования приборов и систем  
для спутникового мониторинга состояния окружающей среды»*

*Докладчик: Ф.С. Завелевич*

**ИКИ РАН, 15-19 ноября 2010 г., Москва**



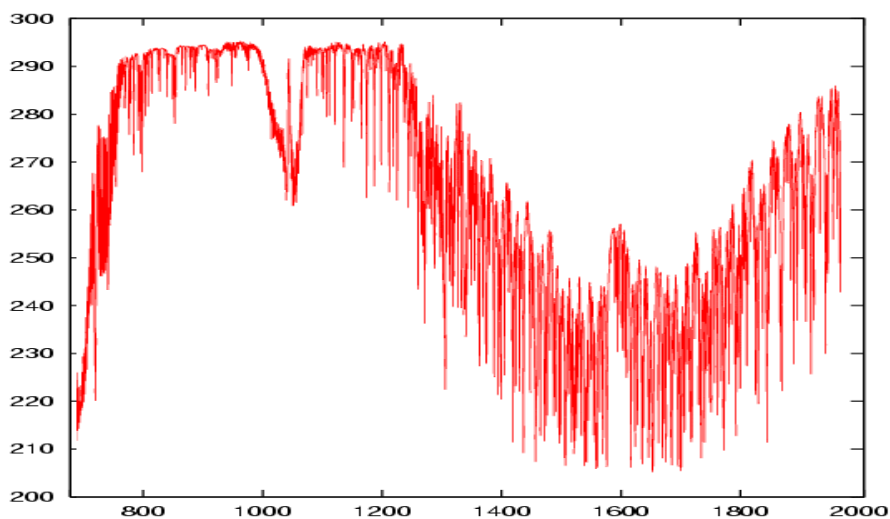
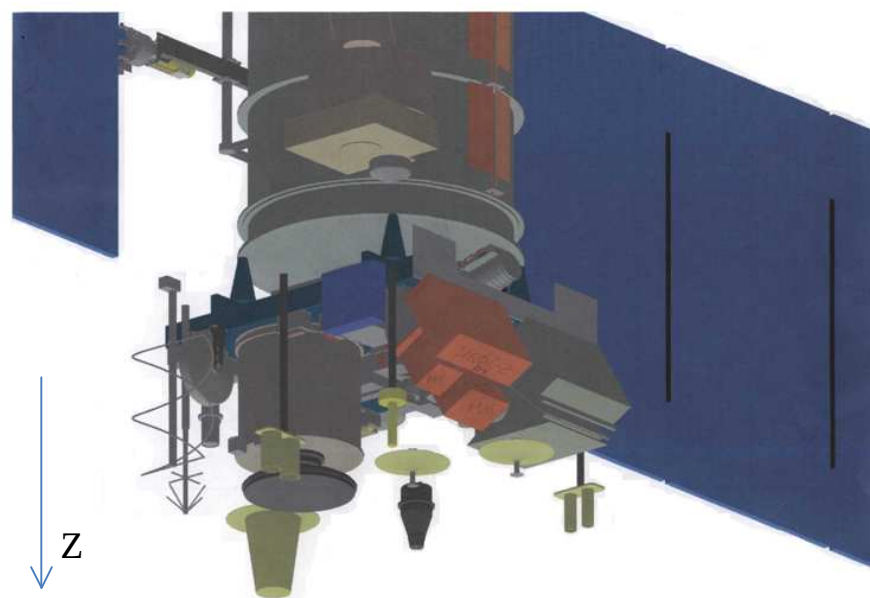
# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 1. Назначение прибора

Прибор ИКФС-2 входит в состав КА «Метеор-М» №2 и предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы и поверхности Земли

### Восстанавливаемые метеорологические параметры:

- профили температуры в тропосфере и нижней стратосфере с погрешностью 1-1.5 К и вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере;
- профили влажности в тропосфере с погрешностью 10% и вертикальным разрешением 1-2 км в нижней тропосфере;
- общее содержание озона с погрешностью не хуже 5% и вертикального профиля содержания  $O_3$  в озоновом слое с погрешностью 10%;
- температура подстилающей поверхности с погрешностью  $< 0.5$  К (вода) и  $< 1$  К (суша);
- доля покрытия облачностью, температура и давление на верхней границеоблачности;
- общее содержание различных малых газовых составляющих атмосферы:  $CH_4$  и  $N_2O$ .



волновое число, (1/см)



# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 2. Требования технического задания

| Параметр                                                                                                | Требования                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рабочий спектральный диапазон                                                                           | не менее 5 - 15 мкм                                                                                                                                     |
| Погрешность измерения спектральной яркости объекта при температуре (280-300)К и длине волны (11-12) мкм | не более 0.5 К                                                                                                                                          |
| Спектральное разрешение                                                                                 | не хуже 0.4 см <sup>-1</sup>                                                                                                                            |
| Пороги обнаружения, (Вт·см)/(м <sup>2</sup> ·ср)                                                        | при 15 мкм - $3 \cdot 10^{-4}$ ; при 13 мкм - $1 \cdot 10^{-4}$ ; при 6 мкм - $3 \cdot 10^{-4}$ ;                                                       |
| Собственные радиопомехи                                                                                 | 100 – 17,1*lg (f / 0,01) [дБмкВ] при (f = 0.01 - 0.15) МГц, свыше 0.15 – 80 дБмкВ                                                                       |
| Работоспособность при воздействии основного излучения радиопередающих устройств                         | напряженность электромагнитного поля 20 В/м в диапазонах 137 – 138 МГц, 625 – 650 МГц, 1,69 – 1,71 ГГц, 3,38 – 3,43 ГГц, 8,025 – 8,4 ГГц, 9,5 – 9,8 ГГц |
| Величина пусковых токов                                                                                 | не более 20 А                                                                                                                                           |
| Работоспособность при наличии пульсаций на сборной шине питания                                         | 1,5 В в диапазоне частот 20 Гц – 10 кГц, 120 дБмкВ в диапазоне 10 кГц-100МГц, импульсы длительностью 20 мс и амплитудой до 5 В.                         |
| Собственные кондуктивные помехи                                                                         | не более 110 дБмкВ в полосе от 20 Гц до 10 кГц                                                                                                          |
| Мех. прочность при воздействии синусоидальной вибрации в течение 600 с                                  | 1g, 1.5g, 2g, 4g, 8g, 10g<br>(20-40) (40-80) (80-160) (160-320) (320-640) (640-2000)                                                                    |
| Стойкость к ударным нагрузкам                                                                           | 40g, при длительности ударного импульса (0.5 – 3) мс, 3 удара на ось                                                                                    |
| Стойкость к воздействию линейных перегрузок                                                             | 5g вдоль продольной оси, 3g вдоль поперечных осей.<br>Суммарное время испытаний - 650 сек                                                               |
| Резонансные частоты аппаратуры                                                                          | отсутствие резонансных частот в диапазоне (0 – 40) Гц                                                                                                   |
| Стойкость к воздействию электронов и протонов ЕРПЗ и высокоэнергетичных протонов по дозовым эффектам.   | 3 г/см <sup>2</sup> 1 г/см <sup>2</sup> 0.5 г/см <sup>2</sup> 0.1 г/см <sup>2</sup><br>0.596 крад 1.59 крад 4.45 крад 53 крад                           |
| Сбоеустойчивость при воздействии элементарных и тяжелых заряженных частиц                               | число сбоев не превышает предельно допустимой величины, либо последствия сбоев устраняются аппаратными и программными средствами                        |



# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 3. Виды испытаний

Определение  
спектрального разрешения  
и рабочего диапазона

Определение порогов  
обнаружения

Определение погрешности  
измерения спектральной  
яркости объекта

Измерение аппаратной  
функции

Испытания на стойкость к  
воздействию  
ионизирующего излучения  
космического пространства



Испытания на электромагнитную  
совместимость  
(на технологическом образце)

Определение собственных  
резонансных частот

Испытания на  
вибрационные воздействия

Испытания на воздействие  
линейных перегрузок

Испытания на воздействие  
ударных нагрузок

Проверка исполнения  
циклограммы прибора в  
целом и оптико-  
механического блока



# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 4. Стенд для радиометрической калибровки

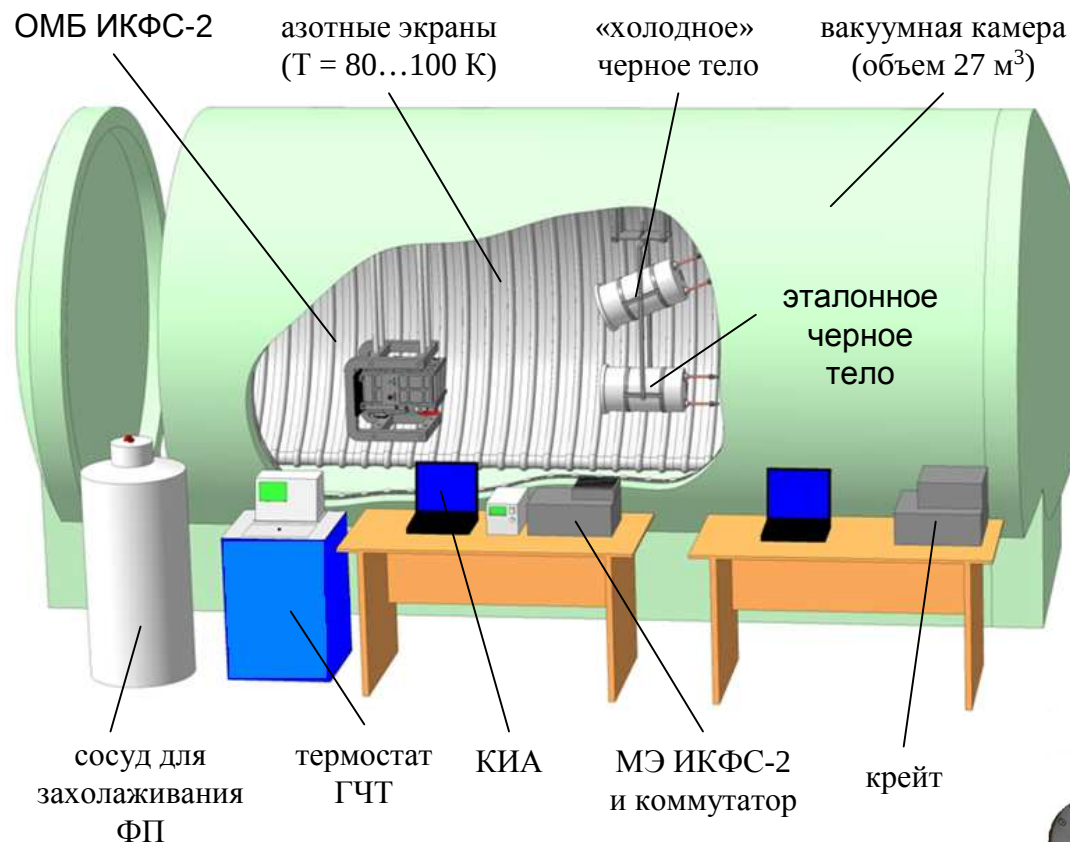


Рис.4.1 Модели эталонного и холодного черных тел, применяемых при наземной калибровке

### Задачи:

- 1) коррекция нелинейности ФПУ;
- 2) определение излучательной способности БМК;
- 3) определение пороговых радиометрических характеристик
- 4) исследование температурной разъюстировки интерферометра

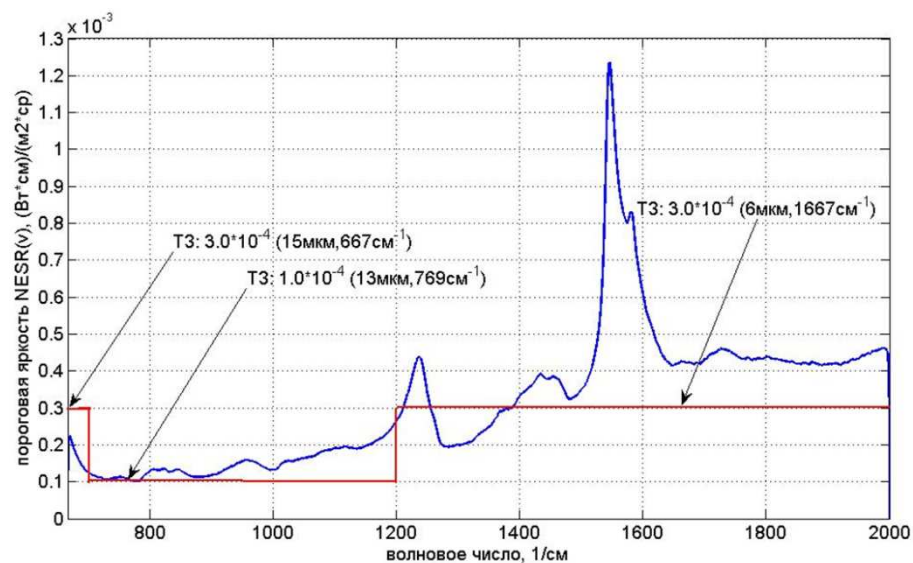
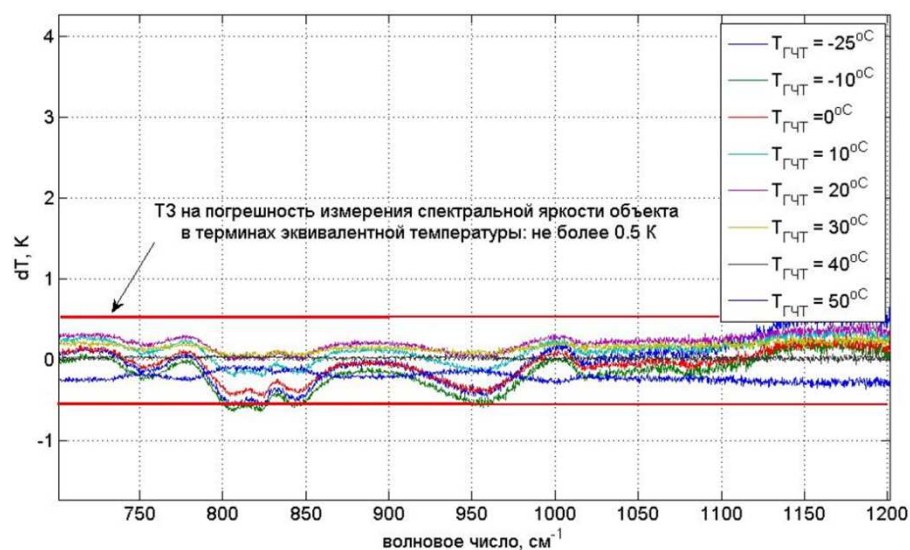
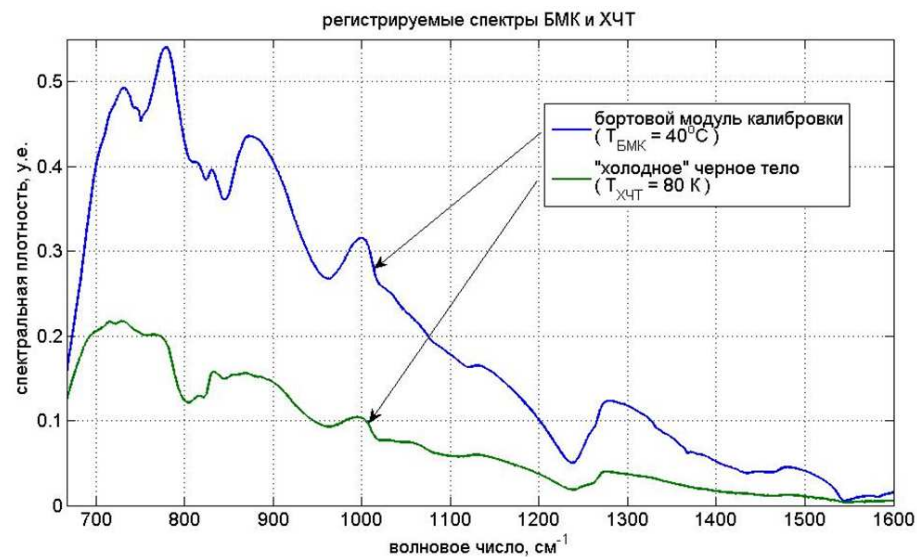
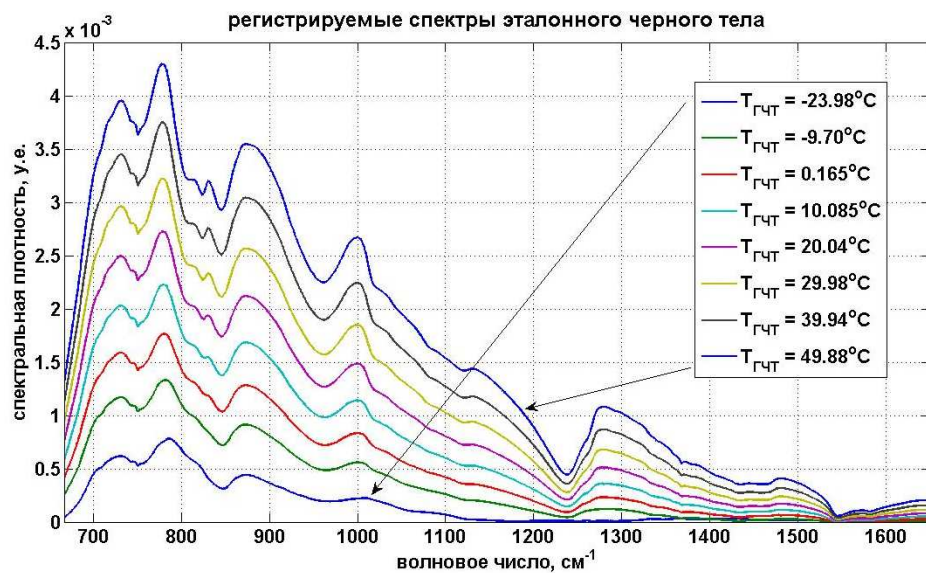
### Объем проводимых измерений:

- температуры прибора: 18, 15, 10, 5, 0, 5, 10, 15, 18 град.С;
- температуры эталонного черного тела: -25, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50 град.С;
- на каждом цикле: измерения ГЧТ, БМК, ХЧТ (по 2x100 ИФГ).



# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 5. Результаты радиометрической калибровки





# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 6. Результаты измерения аппаратной функции

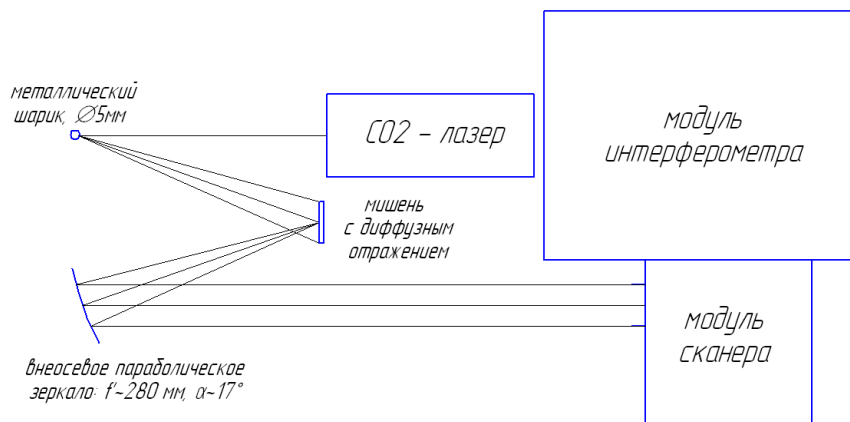
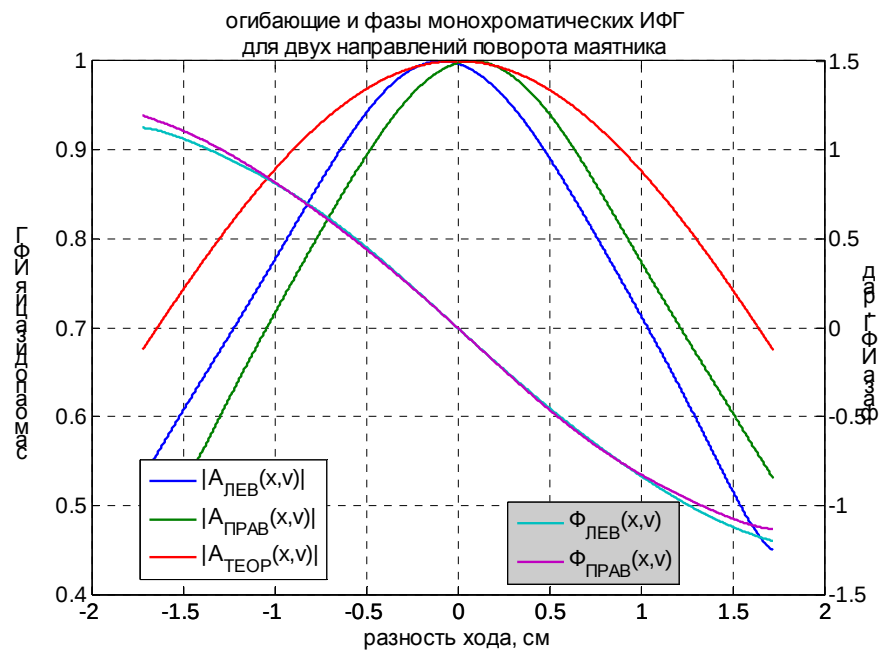
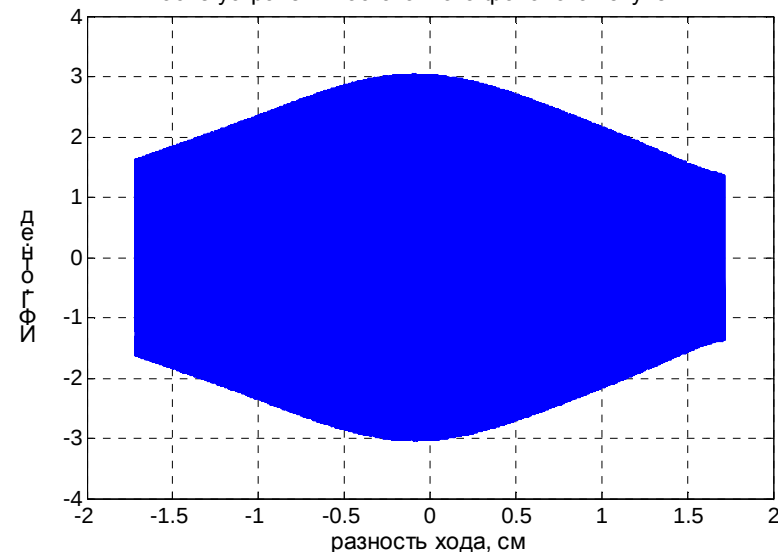
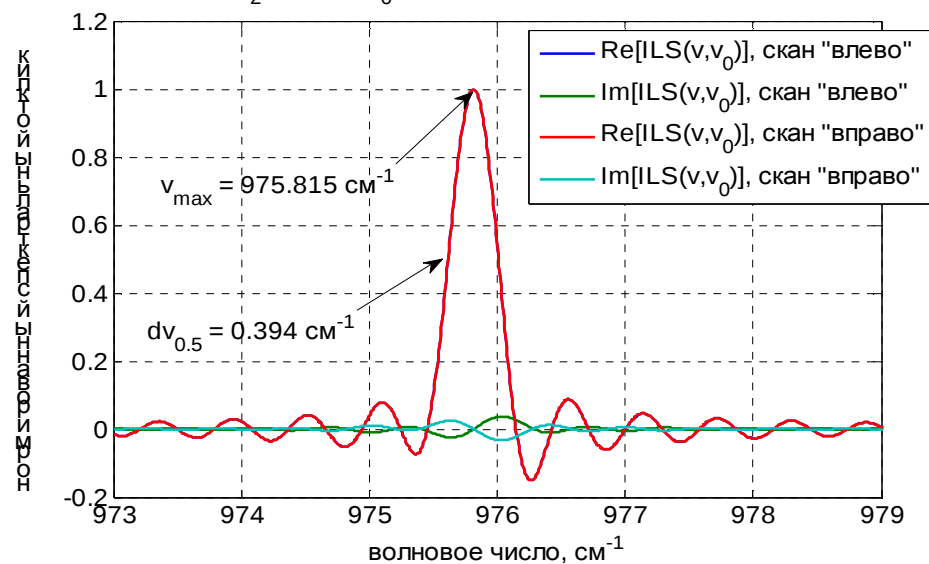


Рис.6.1 Схема измерения аппаратной функции

ИФГ для монохроматического источника, полученная после устранения остаточного фонового излучения



комплексный спектральный отклик на монохроматическое излучение CO<sub>2</sub>-лазера ( $\nu_0 = 975.9311\text{ см}^{-1}$ )



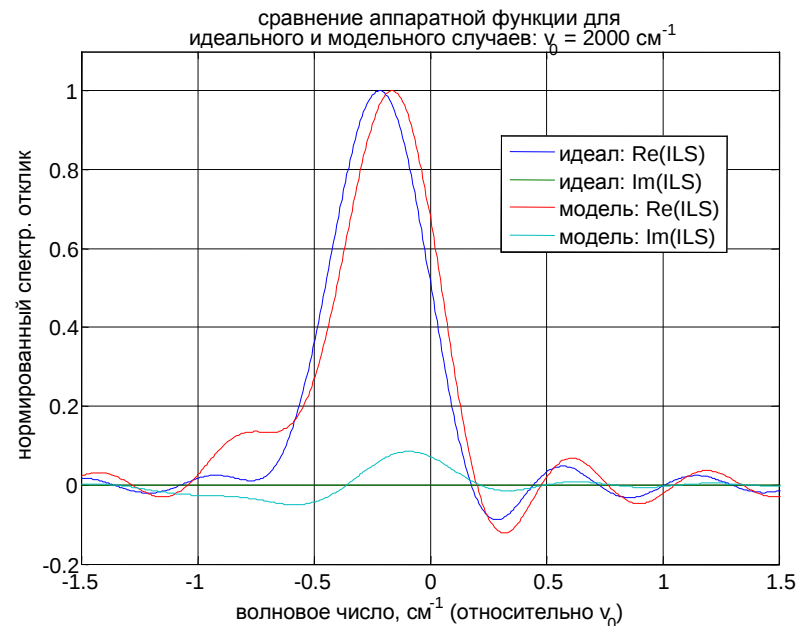
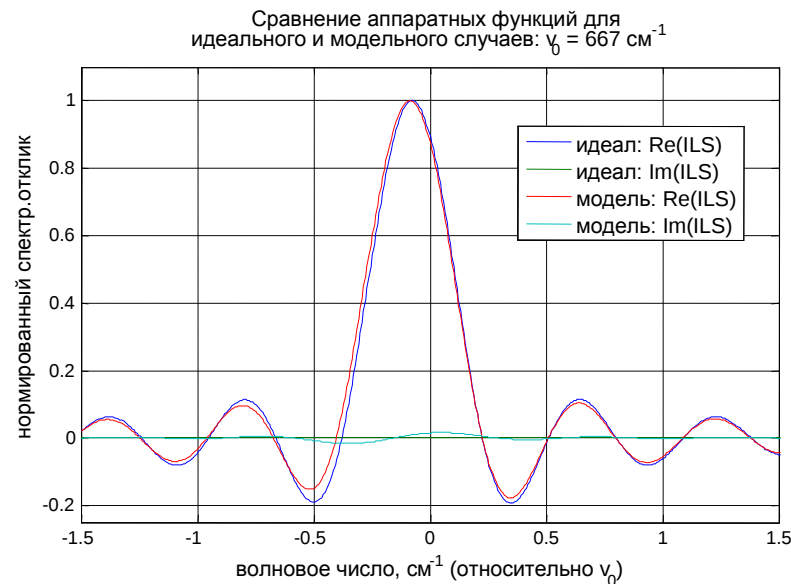
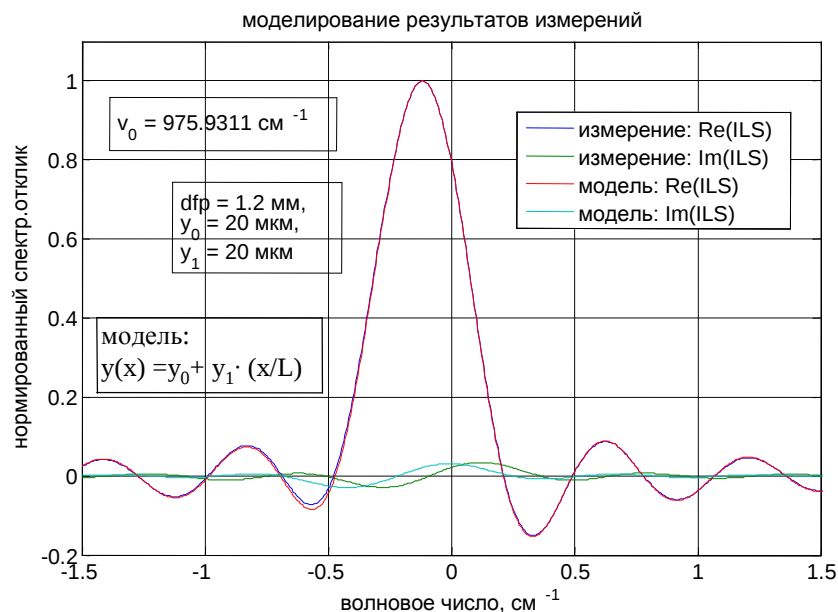


# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 7. Моделирование результатов измерения аппаратной функции

### Факторы, влияющие на вид аппаратной функции

1. Диапазон изменения разности хода
2. Размеры и форма чувствительной площадки фотоприемника (а также поперечная дефокусировка)
3. Угловая чувствительность (весовая функция по отношению к предметным углам):
  - распределение чувствительности по площадке ФП
  - виньетирование в оптической системе
4. Диаметр пятна рассеяния (абберация объектива, а также продольная дефокусировка ФП)
5. Разыюстировка интерферометра (зависимость бокового сдвига вершин уголкового отражателей от разности хода)
6. Нестабильность скорости изменения разности хода

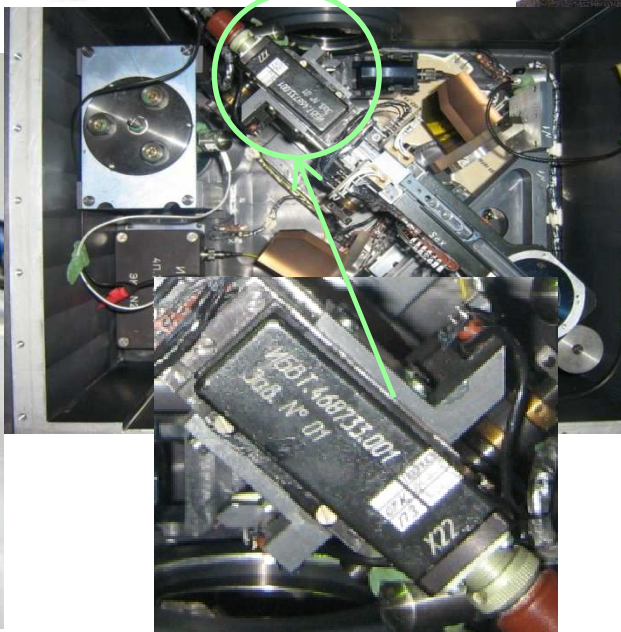
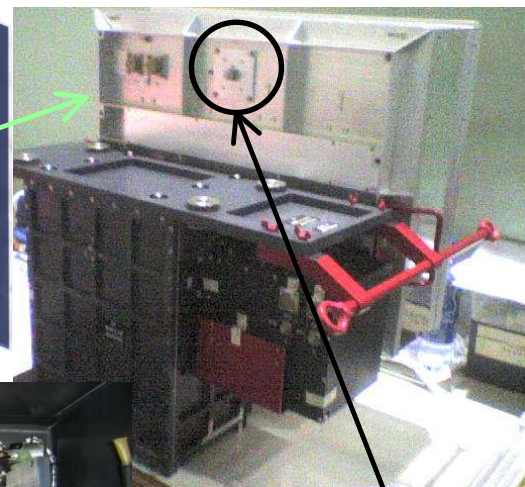
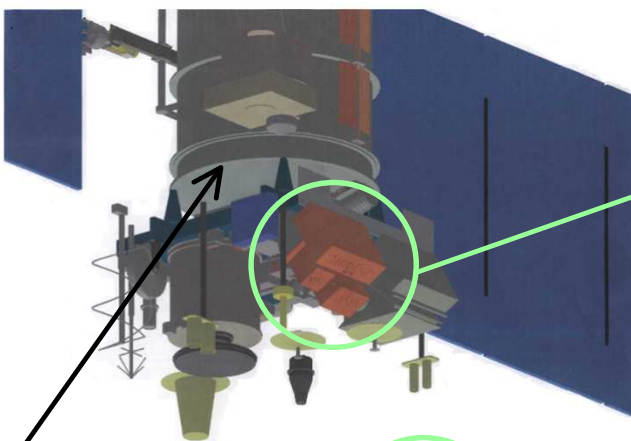
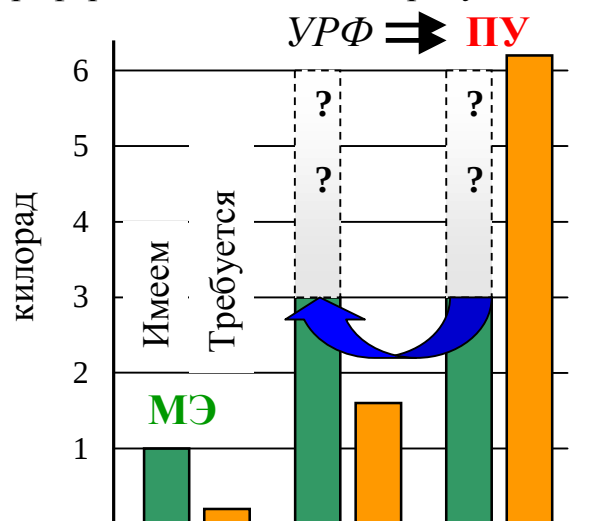




# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## 8. Подтверждение требований по радиационной стойкости

Изделия электроники и интегральные микросхемы сосредоточены в модуле электронном, усилителе референтного канала и предусилителе фотоприемника измерительного канала:





## Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

Испытания предусилителя проведены в ГУП НПЦ "СПУРТ". Продолжительность испытаний – 2 недели.

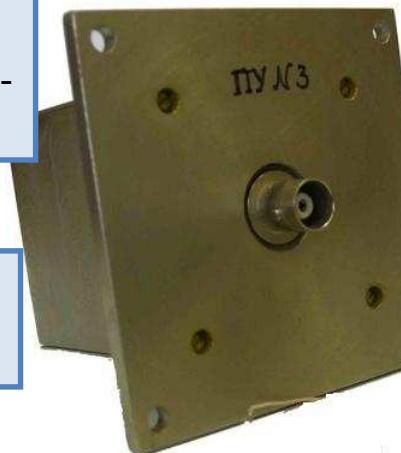


Установка гамма-излучения РХ-γ-30

Фотография: ГУП НПЦ "СПУРТ"

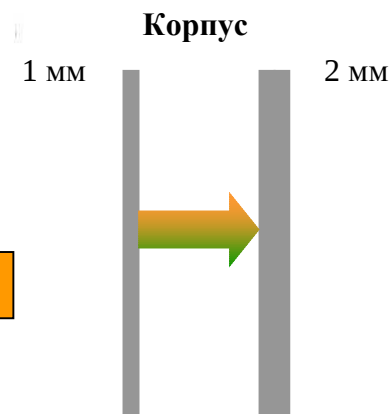
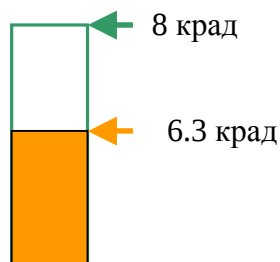
Интенсивность  
облучения – 0.099-  
0.108 γ-рад/с

Суммарная доза  
излучения –  
8 килорад



Температура в  
местах крепления –  
(25-30)°C.

Контроль выходных  
параметров в ходе  
испытаний



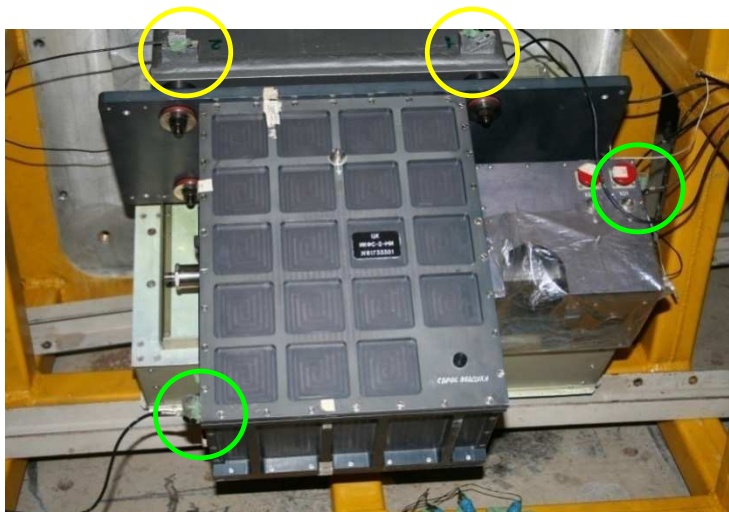
### Выводы:

- ИКФС-2 имеет запас 1.5 и более по суммарной дозе поглощенного ионизирующего излучения;
- ИКФС-2 защищен от массового отказа элементов под воздействием заряженных частиц ограничением по потребляемой мощности с последующей перезагрузкой;
- ИКФС-2 защищен от одиночных сбоев логических операций и памяти программной избыточностью, а также возможностью перезагрузки при возникновении сбоя.



# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

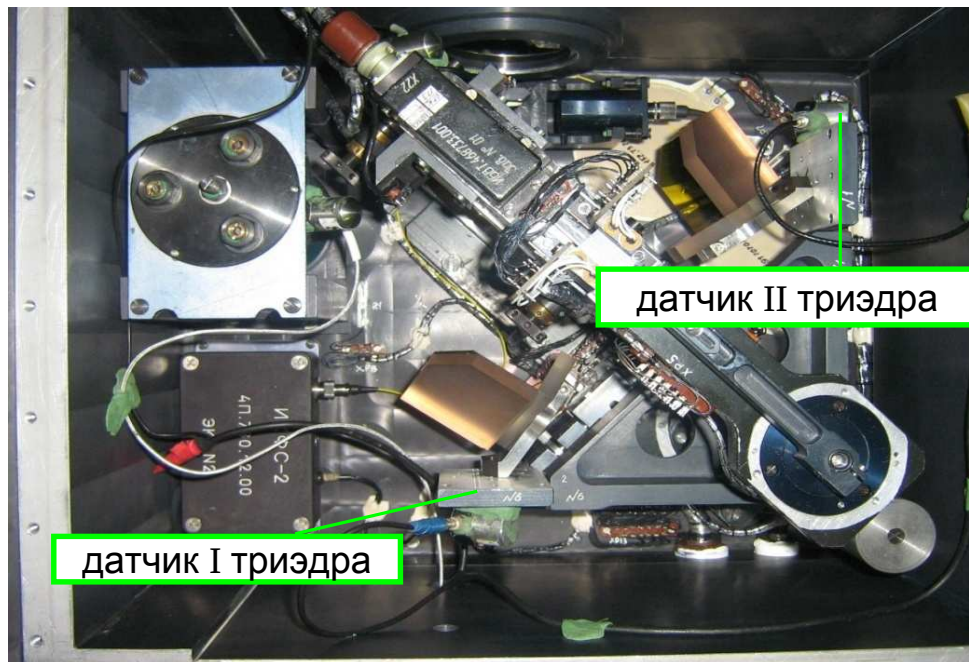
## 9. Испытания на вибрационные воздействия – стенд VS-3208



### Задающие датчики:

3 задающих датчика (желтые), место установки – вблизи каждой из шпилек крепления плиты ОМБ к стойке, кроме одной (показаны 2 из 3). Контрольные датчики (зеленые) – на радиационном холодильнике (не виден), модуле интерферометра (слева), модуле сканера (справа). 2 контрольных датчика в местах крепления триэдров.

**Датчик на столе вибростенда.**



### Вибростенд VS-3208:

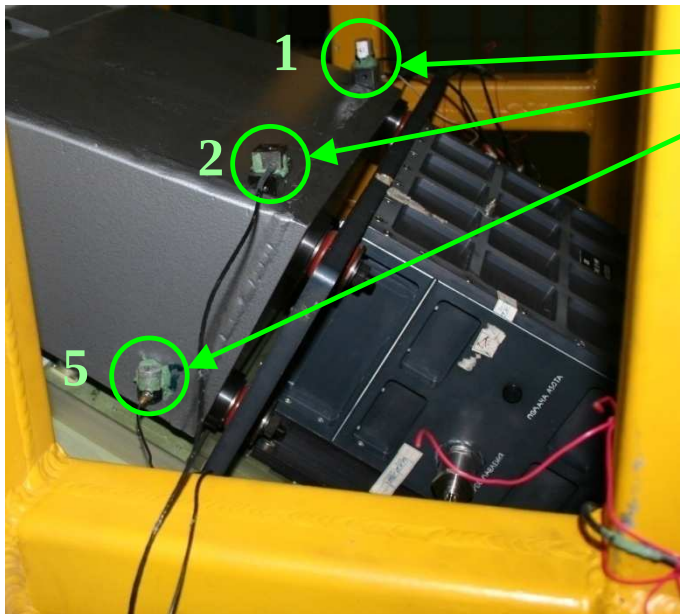
Выталкивающее усилие до 10 тонн.

В ходе испытаний прибор "вывешивается" с помощью талей.



# Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

## Основная проблема: нелинейность вибропередачи крепежного приспособления



По местам крепления коэффициенты вибропередачи приспособления  $g_{\text{места крепления}}/g_{\text{стола}}$  отличаются друг от друга (для оси Y):

| Частота, Гц | Коэффициенты вибропередачи / поперечных составляющих |            |            |
|-------------|------------------------------------------------------|------------|------------|
|             | (Точка №1)                                           | (Точка №2) | (Точка №5) |
| 63          | 0.6 / 1.3                                            | 0.6/ 1.6   | 1/ 1.3     |
| 160         | 1.9 / 1.4                                            | 1.9/ 1.3   | 1/ 1.25    |
| 200         | 3.1/ 1.3                                             | 3.1/ 1.3   | 1/ 1.4     |
| 250         | 2.5/ 2                                               | 3.1/ 1.5   | 1.5 / 1.4  |
| 800         | 0.2 / 4.5                                            | 0.8/ 1.7   | 0.4/ 2.2   |
| 1600        | 0.9 / 3                                              | 1.4/ 5.2   | 2/ 1.7     |
| 1800        | 0.9 / 1.2                                            | 1/ 3.9     | 3.6/ 0.8   |
| 2000        | 1.3/ 2.8                                             | 0.8 / 1.7  | 0.4/ 2.2   |

Изменение направления вектора виброперемещения:  
появление составляющих по поперечным осям.

Величина виброускорения превышает значение в задающей точке в Q раз (на примере оси Y):

$$Q = (g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)^{1/2} / g_y$$

Кроме того, приспособление имеет резонансы до 500 Гц.  
На данных частотах потребная мощность стенда возрастает в 3-5 раз для обеспечения того же уровня испытательной нагрузки.

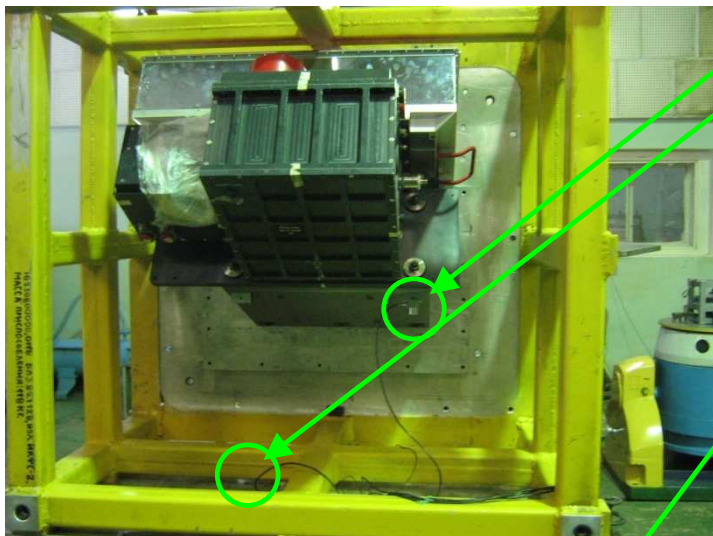
Установлены трехкоординатные датчики , либо 3 взаимно перпендикулярных датчика в одной точке.





## Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

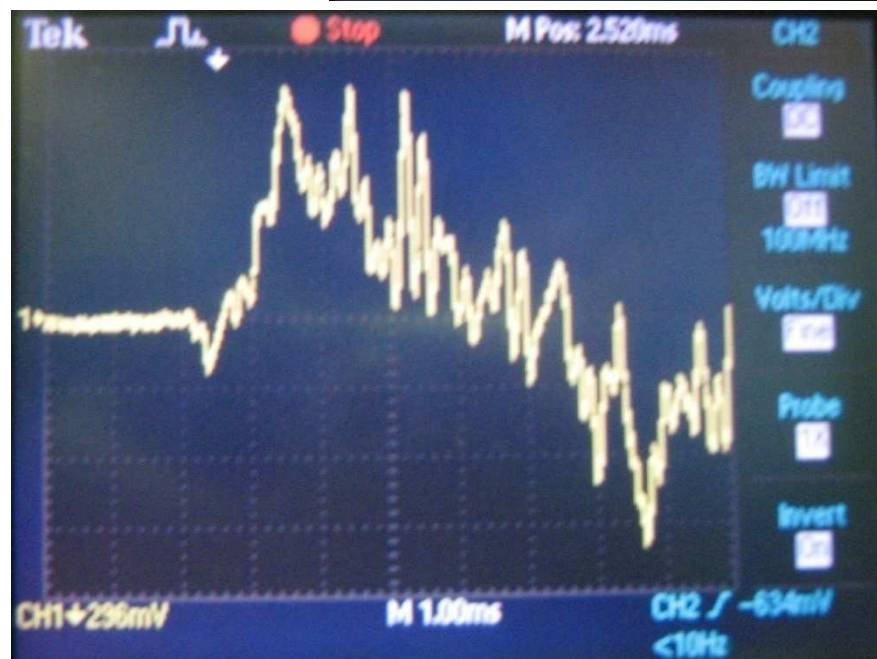
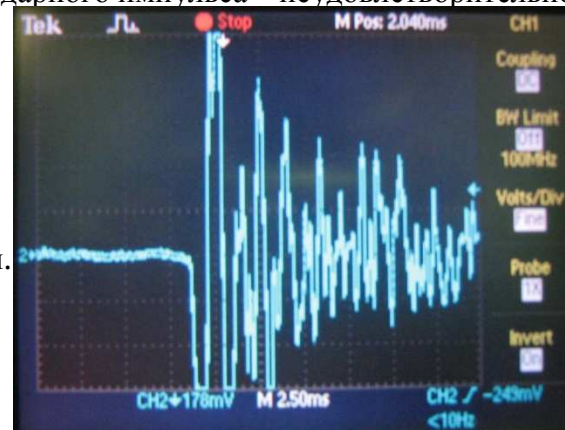
### 10. Испытания на ударные воздействия – стенды TIRAshock-33/88, TIRAshock-4110



Датчик в месте крепления – контрольный. Амплитуда удара – 40 g.  
Датчик на столе – справочный, длительность ударного импульса 0.5-3 мс.  
Проблема – затухающая форма ударного импульса – неудовлетворительно.

Причина – недостаточная жесткость приспособления.  
Консольное крепление изделия.

Решение – установка технологических опор жесткости.  
Проведение испытаний на горизонтальном ударном стенде.  
Удовлетворительная форма ударного импульса:





## Результаты предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

---

### Выводы:

1. Успешно проведен большой объем испытаний опытного образца ИКФС-2. Подготовительные мероприятия, отработка методик испытаний, проведение пробных испытаний позволили провести предварительные испытания **при отсутствии отказов**.
2. Образец соответствует заданным в техническом задании информационным характеристикам (пороги обнаружения, спектральное разрешение, рабочий спектральный диапазон) за исключением порога обнаружения на длине волны 6 мкм. Это произошло вследствие пониженной чувствительности фотоприемника образца При по сравнению с летным.
3. ИКФС-2 соответствует требованиям технического задания по механической прочности, радиационной стойкости, температурно-влажностным режимам, линейным перегрузкам, величинам пульсаций напряжения и стойкости к воздействию основного излучения радиопередающих устройств.
4. ИКФС-2 с замечаниями соответствует требованиям по эмиссии радиопомех (360 кГц, 590 кГц, 654 кГц; максимальное превышение 10-12 дБ при уровне 80 дБ). Окончательное решение о допуске принять по результатам ЭМС в составе КА.
5. Дальнейшие работы включают приемку летного образца ИКФС-2, проведение комплексных испытаний в составе КА, проведение ускоренных испытаний на полный ресурс прибора, получение допуска к летным испытаниям.