



РЕШЕТНЕВ

МИЛЛИМЕТРОН

Отработка критичных технологий
и составных частей зеркальной
системы обсерватории
“Миллиметрон”

Докладчик

Евгений Голубев

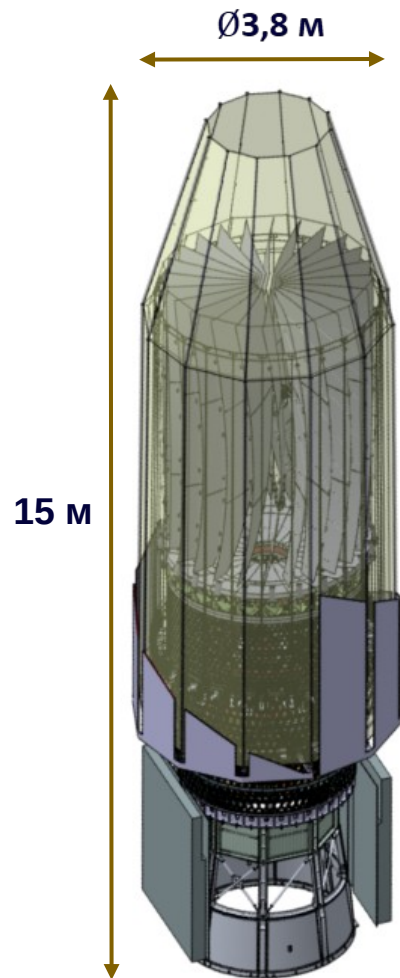
Соавторы

Коллектив проекта и кооперация

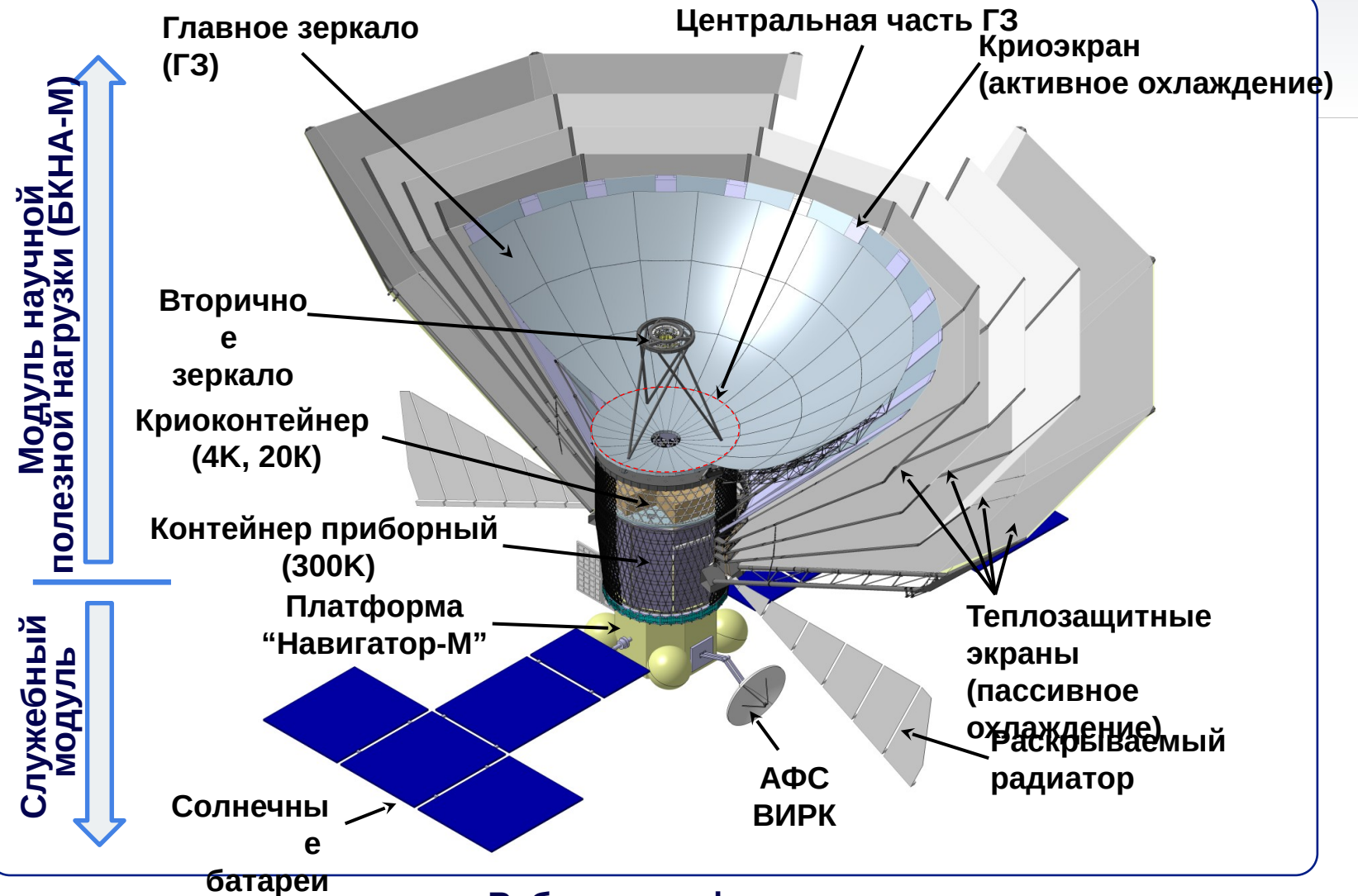
Место и дата проведения

АКЦ ФИАН, г. Москва

14 апреля 2025 г.



Транспортная конфигурация



Рабочая конфигурация

Структура и состав комплекса научной аппаратуры



Общий вид ЗС

- $D_{ГЗ} = 10 \text{ м}$
- $\epsilon_{WFE} \leq 10 \text{ мкм (СКО)}$
- $T_{уз} \text{ до } 4,5 \text{ К}$

Каркас
лепестка

Замки
зачековки

Механизм
раскрытия

Панель силовая

Вторичное зеркало

Панели ГЗ

Центральная
Часть ГЗ

Подкосы

Силовой корпус

Зеркальная система (ЗС)

Главное зеркало (ГЗ)

Форма: параболическое
Материал: углепластик

Система раскрытия ГЗ (СР ГЗ)

Комплект панелей ГЗ (КПГЗ)

Вторичное зеркало (ВЗ)

Форма: гиперболическое
Материал: карбид кремния

Система адаптации и контроля ЗС (САИК ЗС)

Система контроля ЗС (СК ЗС)

Система адаптации ЗС (СА ЗС)

■ изготовлен ОО СР ГЗ для проведения КДИ;
■ изготовлены ОО СЧ и проводятся АИ;
■ выпускается КД на систему обезвешивания.
■ Доработана

технология изготовления;
■ изготавливаются ТО всех 5 типоразмеров панелей;
■ Запускается изготовление ОО и

■ На этапе ТП изготовлен макет (М1:3) и отработана технология изготовления.

■ Изготовлен КТМ и стенд для проведения АИ;
■ Проводятся испытания КТМ СК ЗС.

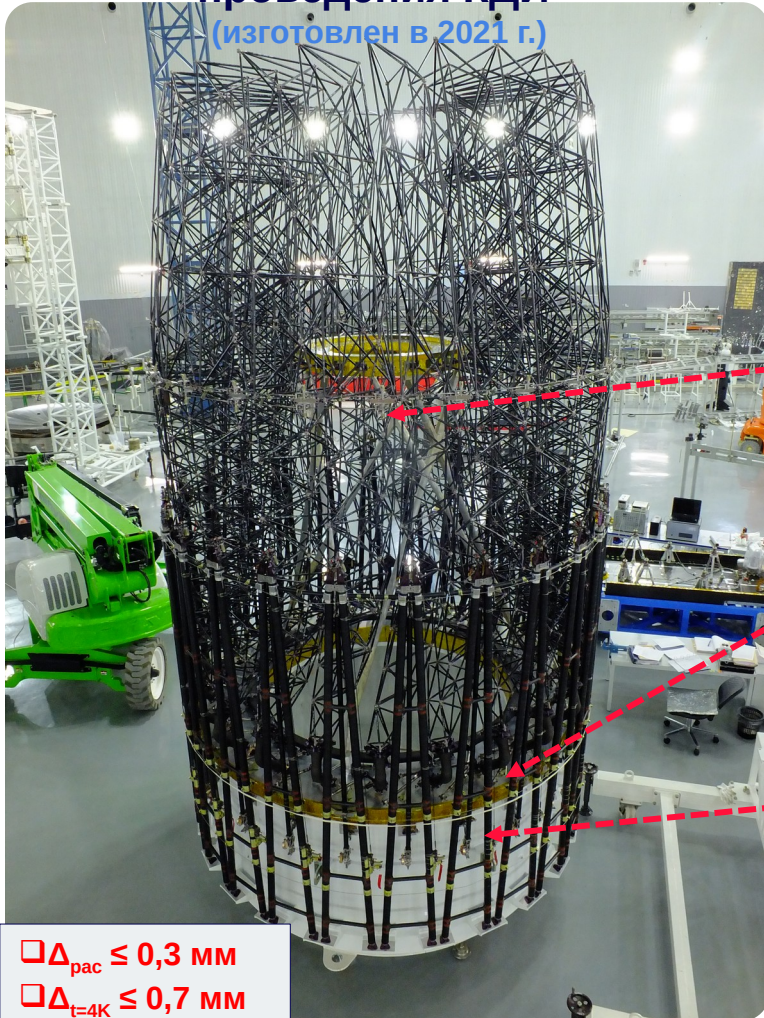
■ Изготовлены КТМ актюатора из состава СА, проводятся АИ;
■ Выпускается РКД на СЧ.



Система раскрытия главного зеркала

ОО №1 системы раскрытия ГЗ для проведения КДИ

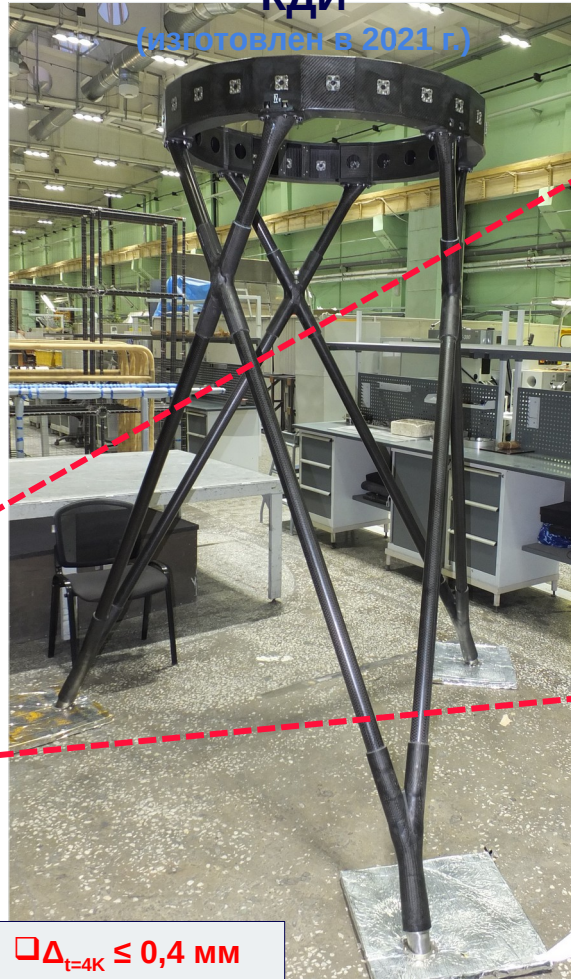
(изготовлен в 2021 г.)



$\Delta_{\text{рас}} \leq 0,3 \text{ мм}$
 $\Delta_{t=4K} \leq 0,7 \text{ мм}$

ОО №1 Фермы опорной вторичного зеркала (ФОВЗ) для проведения КДИ

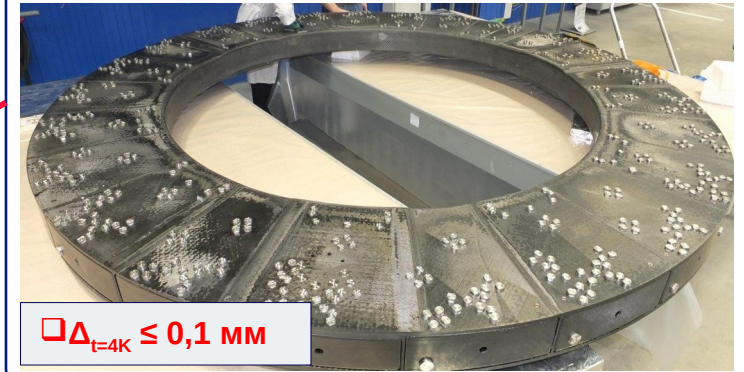
(изготовлен в 2021 г.)



$\Delta_{t=4K} \leq 0,4 \text{ мм}$

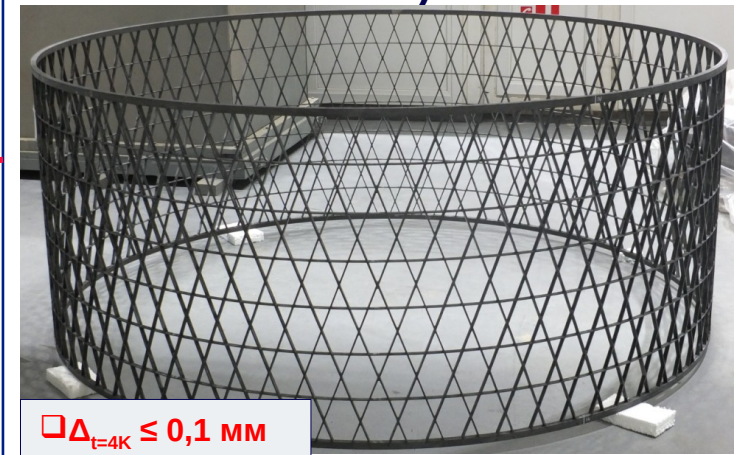
ОО №1 Панели силовой (ПС) для проведения КДИ

(изготовлен в 2025 г.)



$\Delta_{t=4K} \leq 0,1 \text{ мм}$

ОО №1 Корпуса силового контейнера охлаждаемого (КС КОГ)

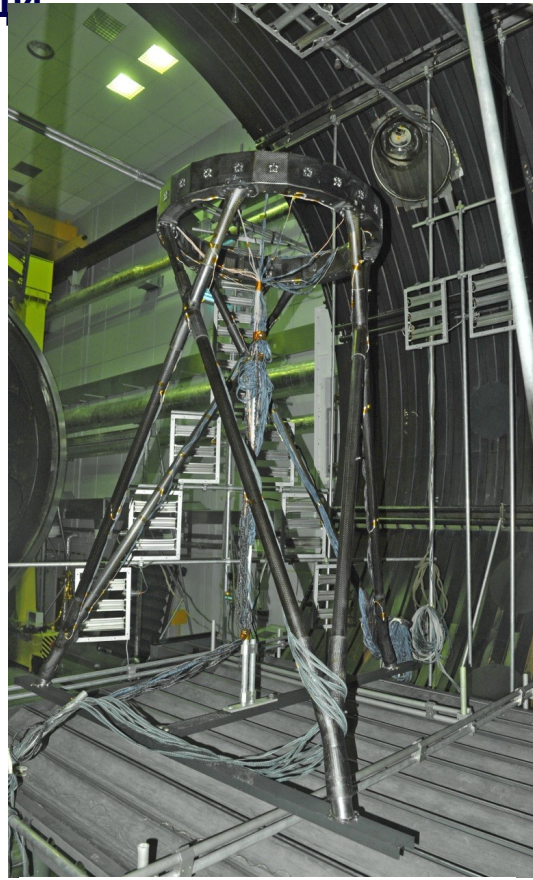


$\Delta_{t=4K} \leq 0,1 \text{ мм}$

Опытный образец №1 ФОВЗ на КДИ

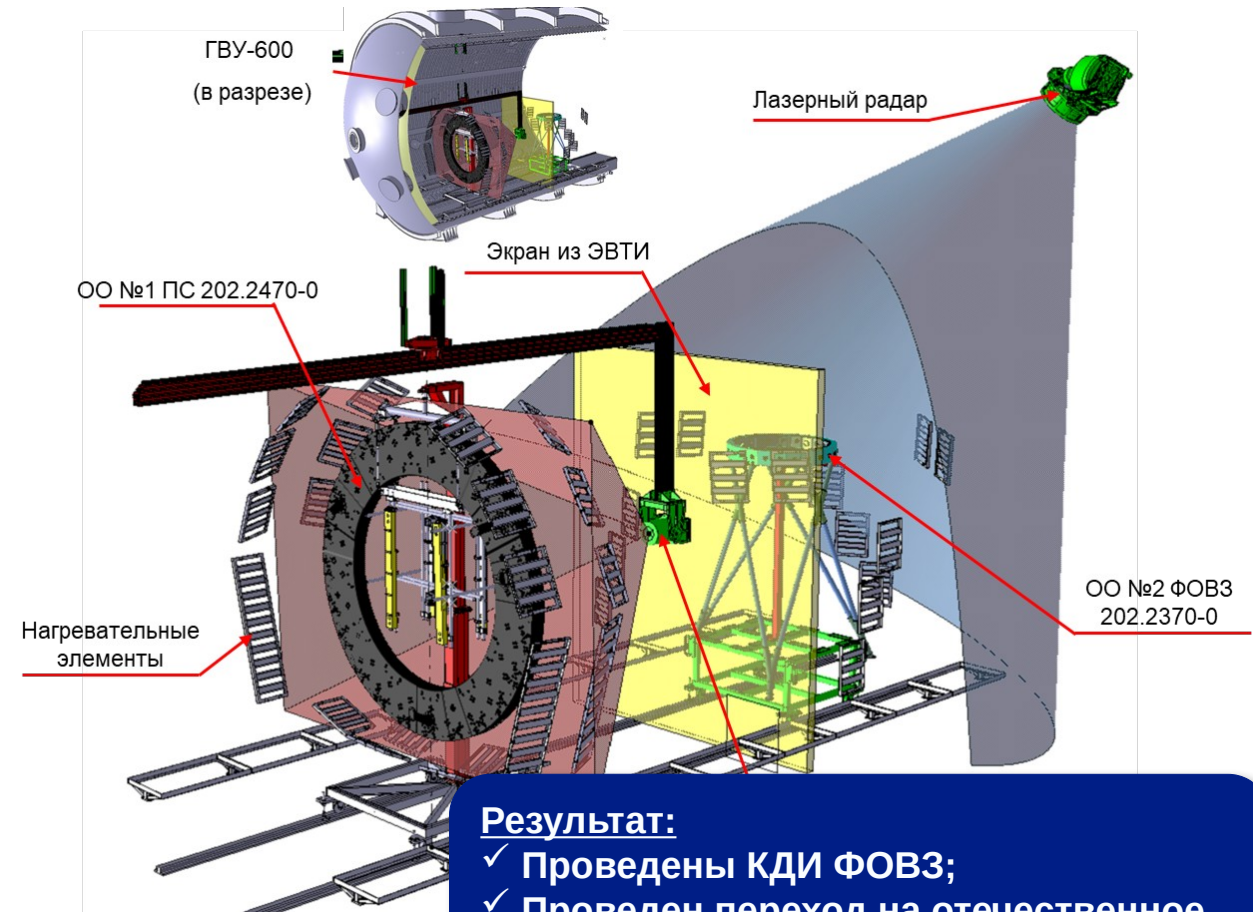


Испытания на жесткость



Испытания в криовакуумных условиях

Схема испытаний ПС и ФОВЗ в КВУ (март 2025 г.)

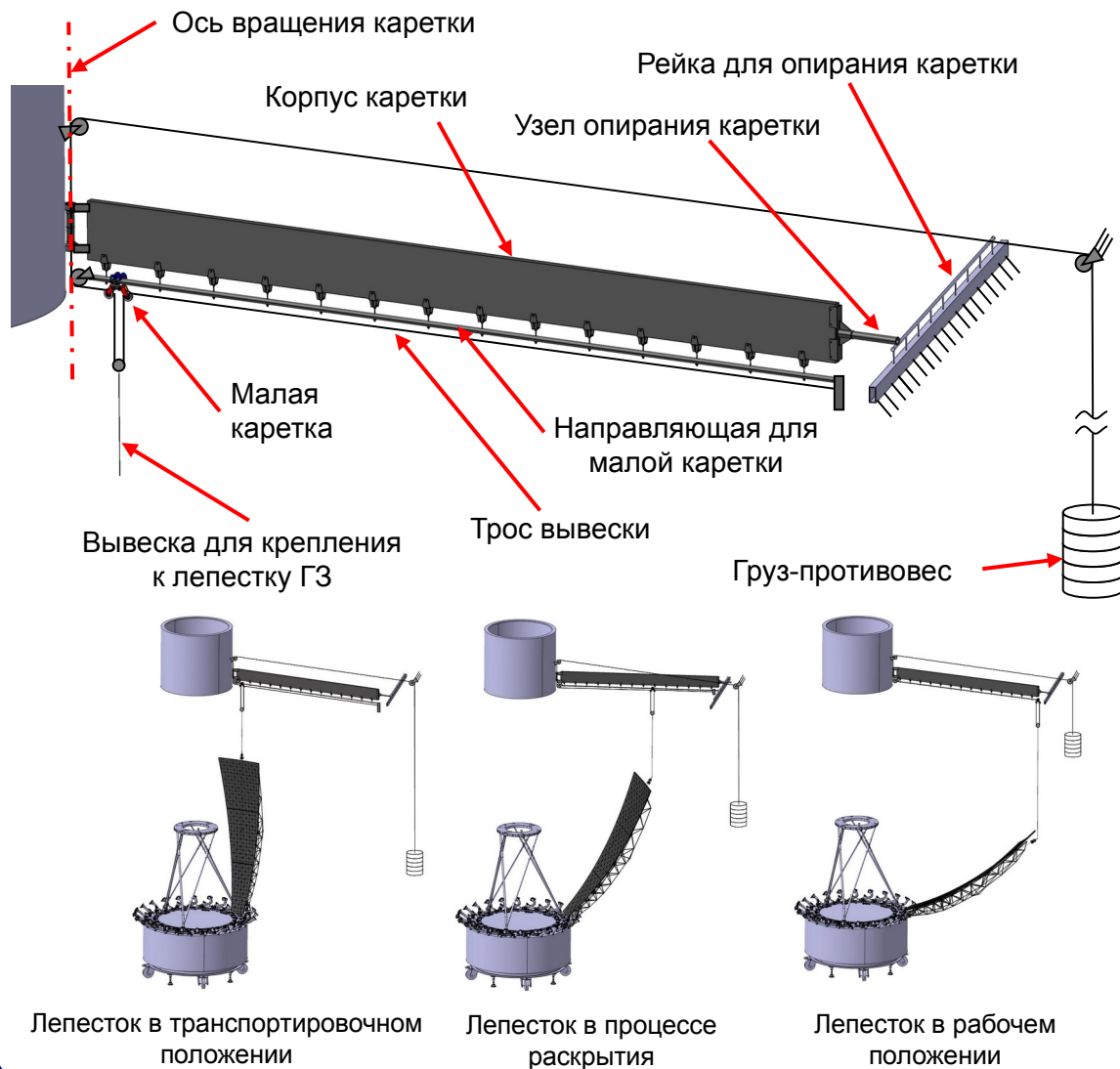


Результат:

- ✓ Проведены КДИ ФОВЗ;
- ✓ Проведен переход на отечественное сырье;
- ✓ Изготовлены ОО силовых конструкций, проводятся АИ;

Схема обезвешивания главного зеркала (СО ГЗ)

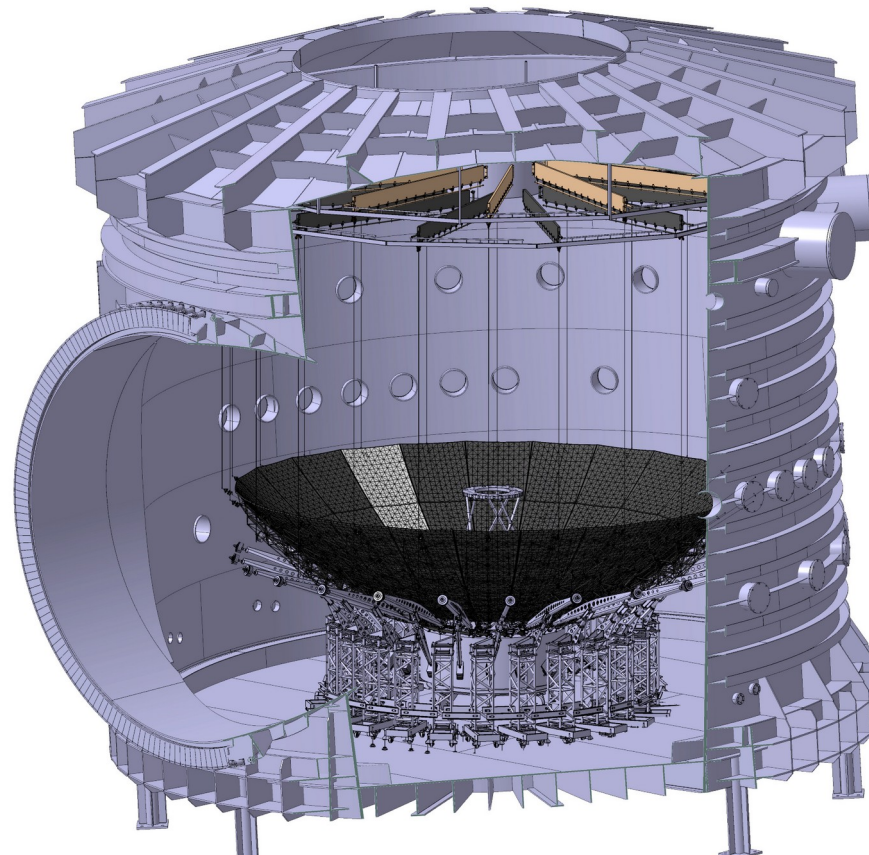
СО ГЗ с использованием двухопорной каретки



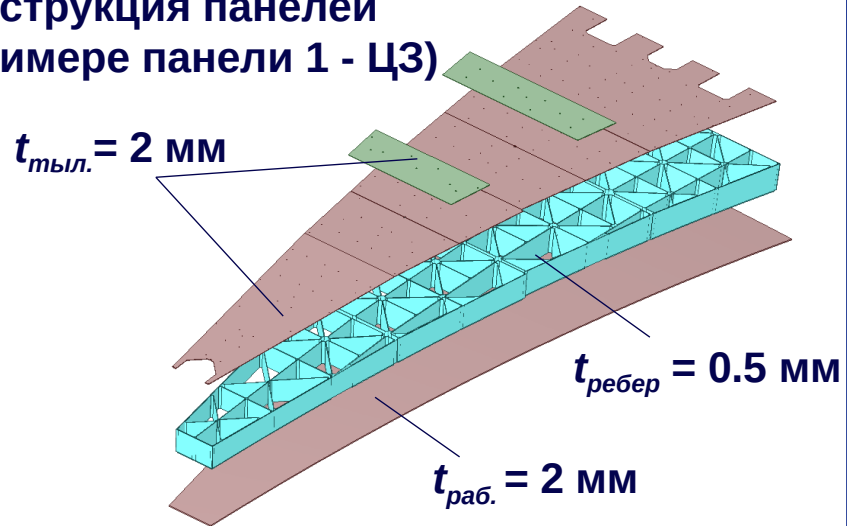
РМ для проведения испытаний ГЗ в НКУ



РМ для проведения испытаний ГЗ в КВУ



Конструкция панелей (на примере панели 1 - Ц3)



- **Материал:** Высокомодульный углепластик на цианат-эфирном связующем
Низкий КЛТР ($\alpha_{\text{ц}} \approx 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$);
Высокая удельная жесткость;
Низкое влагопоглощение;
Повышенная трещиностойкость;
- **Схема армирования – квазиизотропная:** $[0^\circ / 90^\circ / +45^\circ / -45^\circ]_{\text{ns}} + \text{Си фольга}$
- **Элементы соединены криостойким клеем**



Фото технологического образца
панели 1

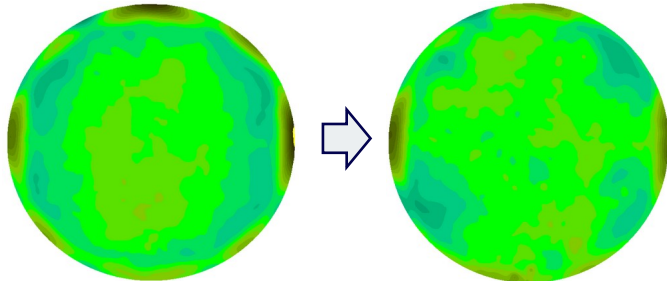


*тыльная сторона

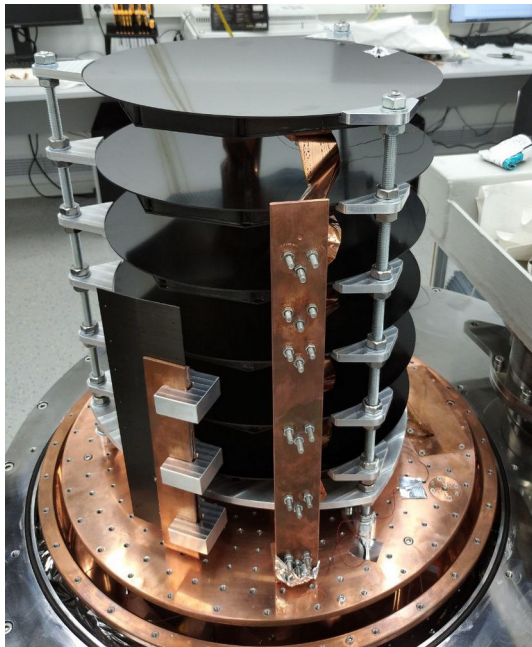
Технические требования к панелям:

- Точность поверхности (СКО) в УЭ (4К):
 - панель 1 $\leq 3 \text{ мкм}$
 - панель 2 $\leq 5 \text{ мкм}$
 - панель 3 $\leq 7 \text{ мкм}$
 - панель 4 $\leq 8 \text{ мкм}$
- Шероховатость: $Ra \leq 0.3 \text{ мкм}$
- Коэффициент отражения: $R \geq 0.98$
- Конструктивно-массовое совершенство $\leq 10 \text{ kg/m}^2$

Карты поверхности МТО (Ø320 мм)

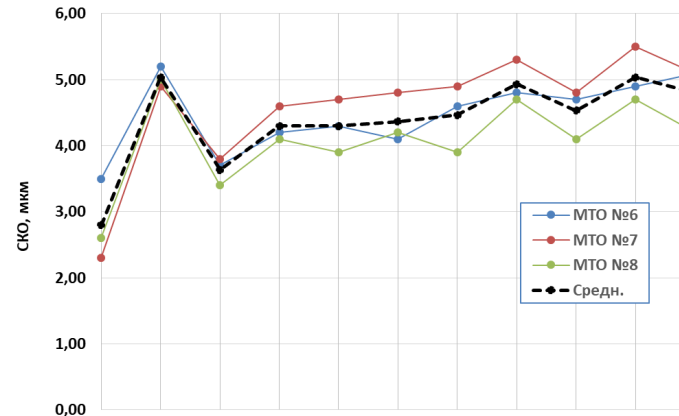


до ТЦ – 1,6 мкм (СКО) после ТЦ – 2,1 мкм (СКО)

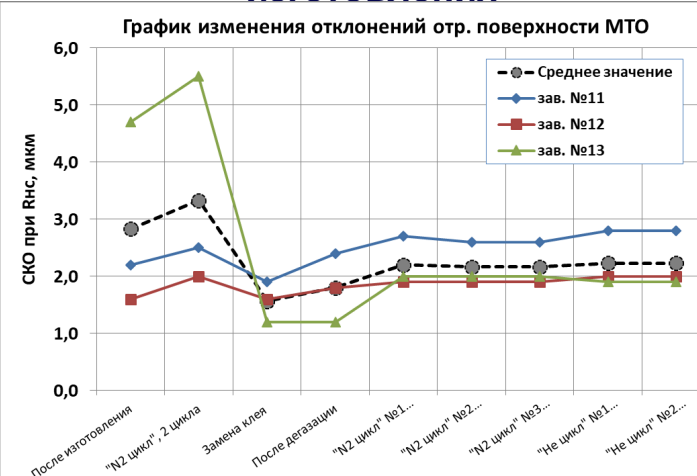


МТО в криостате для отработки термоциклирования до 4К

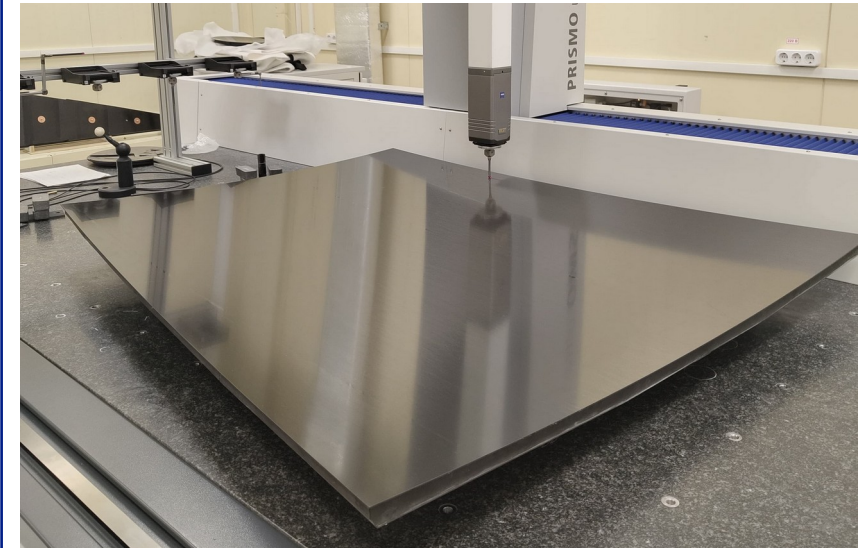
Формостабильность при ТЦ



Доработка
технологии
изготовления



Технологический образец панели 4



Вид с отражающей стороны



Результат:

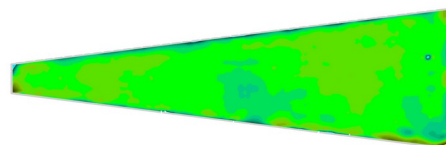
- ✓ Доработана технология изготовления;
- ✓ Оптимизирован режим термоциклирования;
- ✓ Изготовлены ТО панели 4;

Отработка масштабируемости и повторяемости технологии изготовления

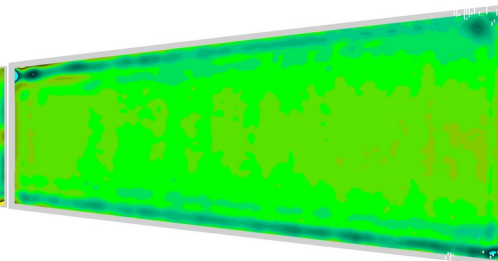
✓ В 2021 г.
изготовлен
комплект матриц
всех 4
типоразмеров

■ Изготавливается
комплект ТО
панелей
всех типоразмеров

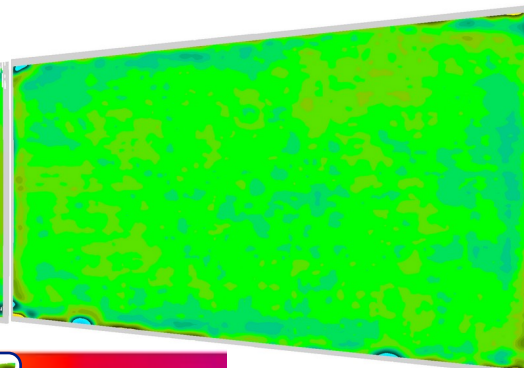
Матрица панели 1
SFE = 1,2 мкм (СКО)*



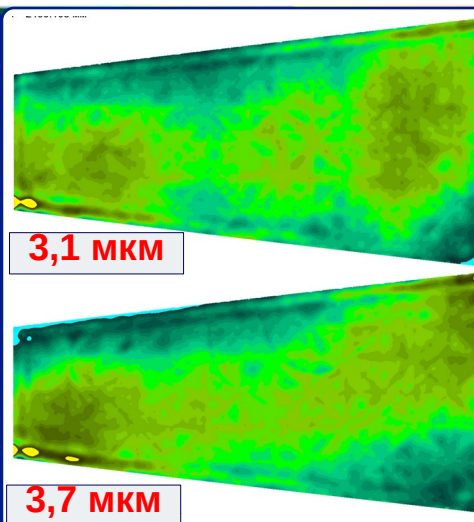
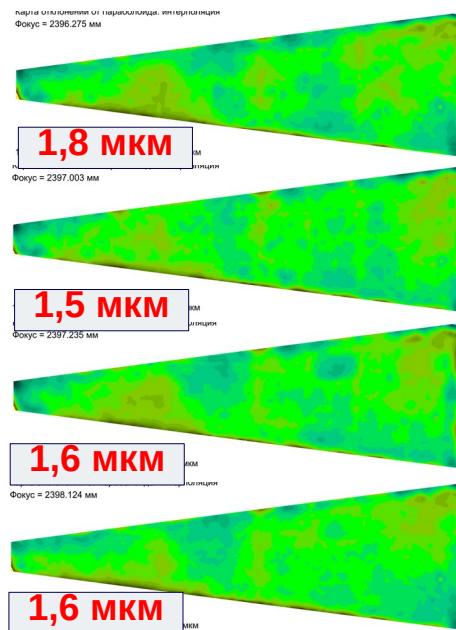
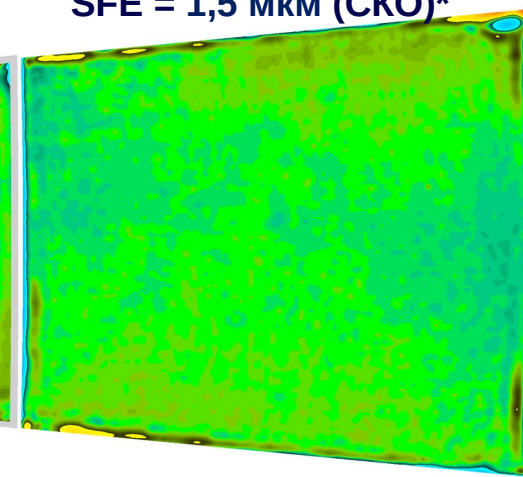
Матрица панели 2
SFE = 1,4 мкм (СКО)*



Матрица панели 3
SFE = 1,2 мкм (СКО)*



Матрица панели 4
SFE = 1,5 мкм (СКО)*



ТО панели 3
SFE = мкм (СКО)

ТО панели 4
Зав. № 52 = мкм (СКО)

Изготовление 10 ТО панелей
завершится в сентябре 2025 г.

Образцы с многослойным радиоотражающим покрытием



Схема измерительной установки

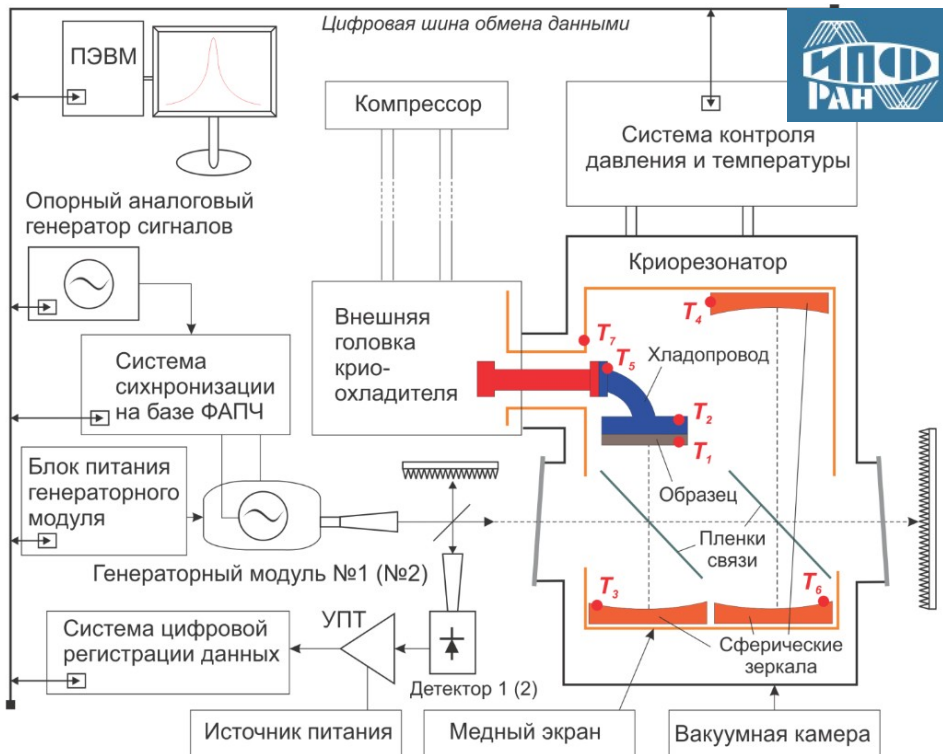
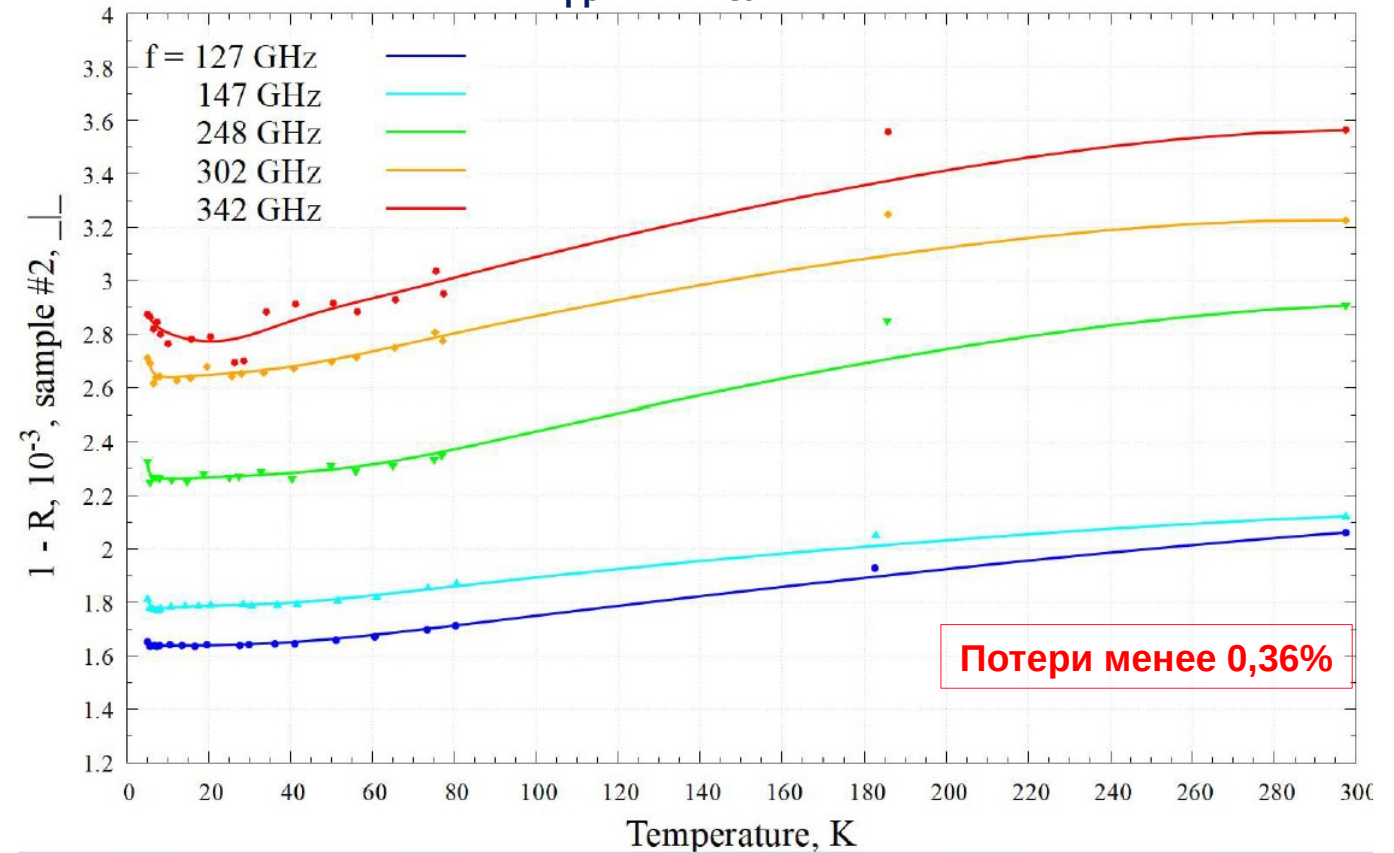


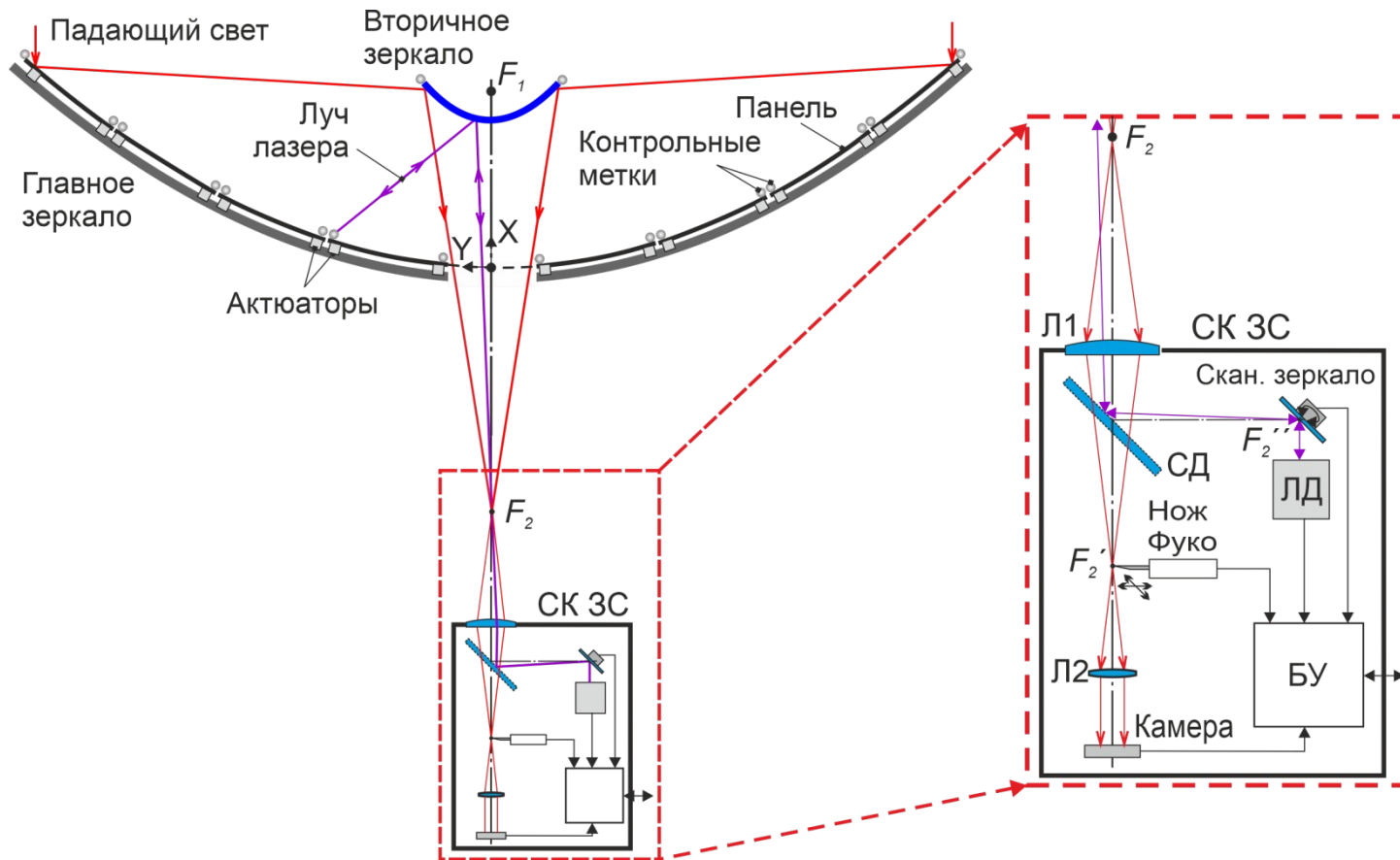
График потерь на отражение в зависимости от температуры и длины волны



Результат:

- ✓ Доработана схема армирования отражателя;
- ✓ Испытано отражающее покрытие при

Оптическая схема системы контроля ЗС



F_1 – точка фокуса ГЗ, F_2 – вторичный фокус ЗС, F_2' , F_2'' – изображения F_2 ,
 M – зеркало, $L1$, $L2$ – объективы; СД – светодетектор, ЛД – лазерный
 дальномер,

СК ЗС состоит из 2х самостоятельных каналов:

1) канала предварительной настройки на базе лазерного 3D-сканера;

▪Рабочий диапазон расстояний – от 1 до 12 м

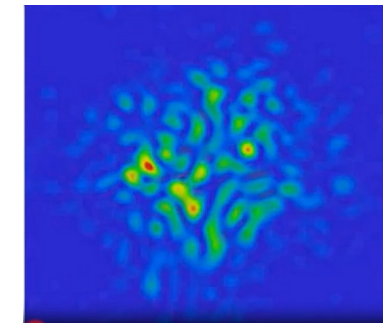
▪Погрешность измерения расстояний ≤ 9 мкм (СКО)

2) канала точной настройки –

Анализатора (сканирование ножом

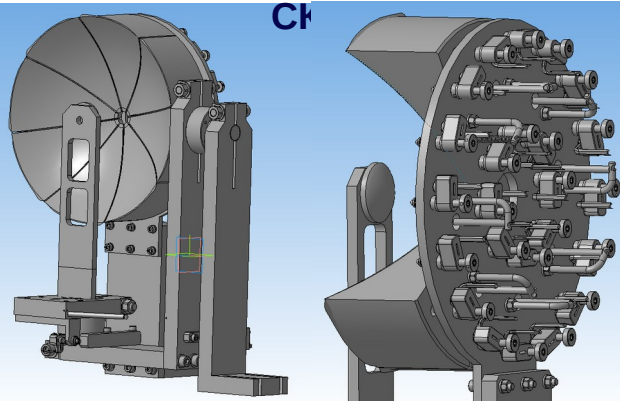
1 стадия - грубая настройка (концентрация пятен)

2 стадия - точная юстировка (фазировка)



Макет ЗС 2-ой ступени

СК



Вид спереди

Вид сзади

ГЗ разделено на 8 сегментов по 3 актуатора

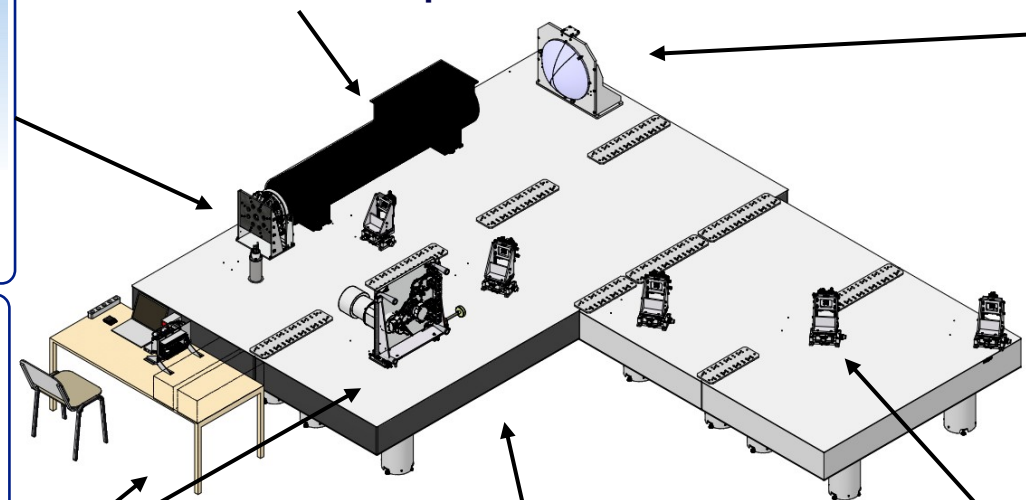
ВЗ имеет 6 степеней свободы

КТМ СК ЗС с РМ оператора



Стенд для проведения автономных испытаний (АИ) СК ЗС

Автоколлиматор



Основание
виброизолированное
(Габариты: 5000 x 6000 мм)

Макет ЗС для 1-ой «грубой» ступени

СК



Макет ВЗ

Задача:
отработка работы
1 ступени СК ЗС
(лазерный
дальномер)
по контрольным
меткам на панелях
ГЗ и ВЗ с
погрешностью
контроля
положения меток $\leq$
30 мкм

Макет ГЗ

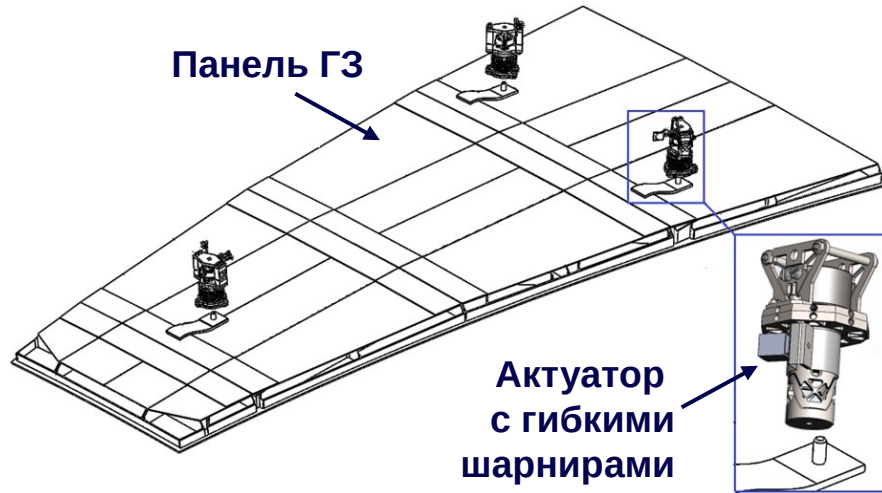


Контрольные метки на опти-
механических подвижках

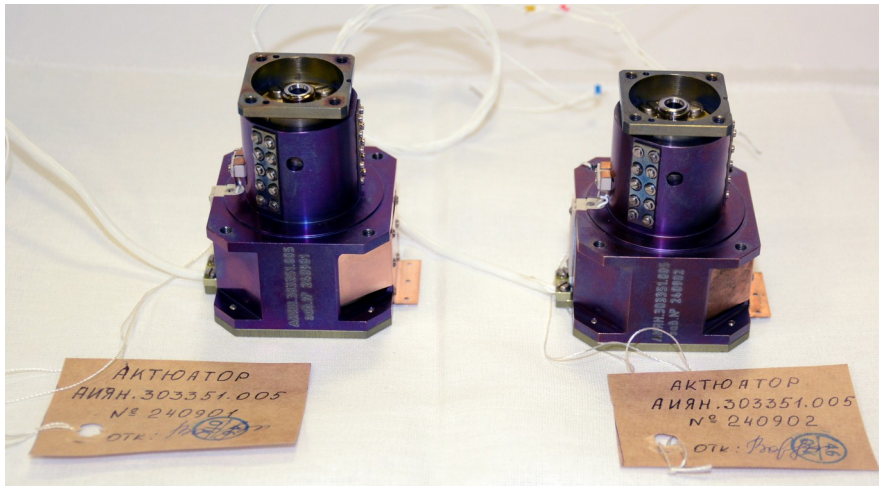
Результат:

- ✓ Изготовлен КТМ СК ЗС;
- ✓ Изготовлен стенд для проведения АИ.

Схема адаптации панелей ГЗ – трипод



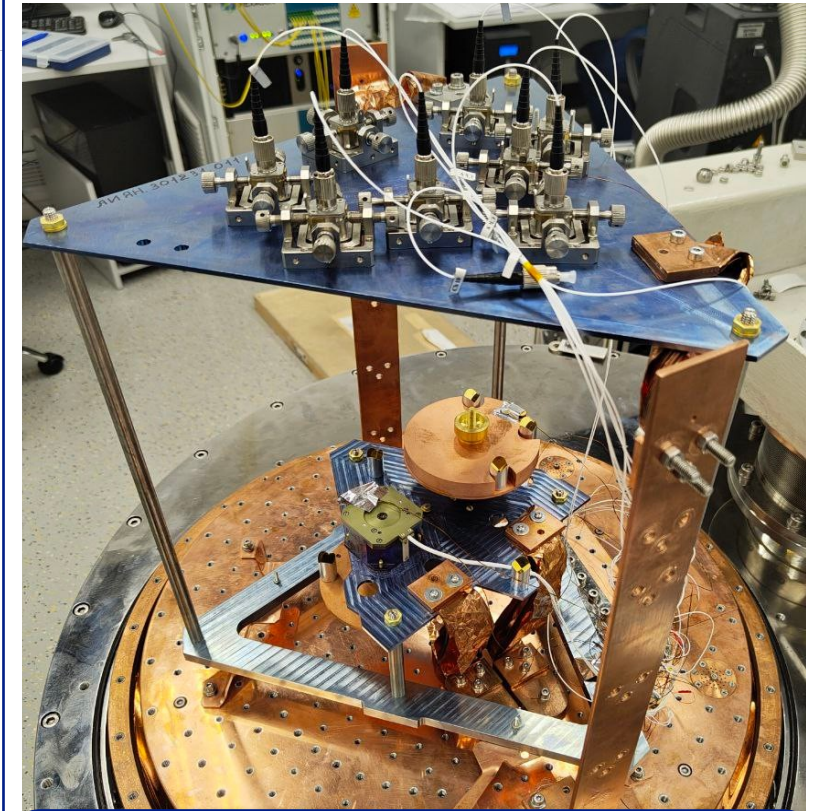
КТМ актуатора (на базе пьезопривода)



Ключевые технические параметры актуатора:

- дискретность хода $\leq 0,5$ мкм;
- точность 2-стороннего позиционирования ≤ 1 мкм;
- работа при температурах до 4 К;
- тепловыделение ≤ 150 мДж/мкм;
- развиваемое усилие ≥ 86 Н;
- ✓ возможность отработки адаптации в наземных условиях без обездвешивания панелей.
- усилие самоторможения ≥ 520 Н;
- ✓ не требует дополнительной системы транспортной зачековки.

Испытания КТМ актуатора в криовакуумных условиях (при 4 К)



Результат:

- ✓ Изготовлены КТМ актуатора;
- ✓ Проведены испытания в нормальных климатических и криовакуумных условиях.

1. Работы по наиболее критичным составным частям БКНА-М, главным образом, зеркальной системы и приборов из состава БЭК, находятся на этапах изготовления технологических или опытных образцов СЧ и проведения их автономных испытаний;
2. Работы по составным частям Зеркальной системы в сентябре 2025 года завершатся криовакуумными и механическими испытаниями размеростабильных силовых конструкций ГЗ:
 - Подтверждением показателей точности и повторяемости для технологии изготовления панелей по результатам изготовления комплекта образцов панелей всех типоразмеров;
 - Криовакуумными и механическими испытаниями опытного образца панели внешней;
 - Проведением автономных испытаний макета системы контроля ЗС;
 - Изготовлением опытных образцов актуатора и завершением автономных испытаний.



Спасибо за внимание!