

Широкоапертурная интегрирующая сфера на основе светодиодов в составе измерительно-калибровочного комплекса

Гаврилов В.Р.¹⁾, Хлевной Б.Б.¹⁾, Отряскин Д.А.¹⁾, Ивашин Е.А.¹⁾,
Солодилов М.В.¹⁾, Дунаев А.Ю.¹⁾, Лузганова М.Ю.²⁾, Бутяйкин Н.А.²⁾

¹⁾Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГБУ «ВНИИОФИ»). 119361, г. Москва, ул. Озерная, 46.

²⁾Публичное Акционерное Общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (ПАО КМЗ). 143403, Московская область, г. Красногорск, ул. Речная, 8.

Заказчик: ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (ПАО КМЗ)

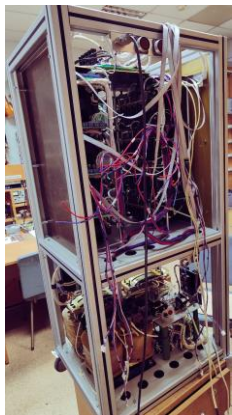
Начало работ: 06.2023

Окончание работ: 11.2025

Выполнено в рамках федерального проекта «Комплексное развитие космических информационных технологий» («Сфера») государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России»

РСТ

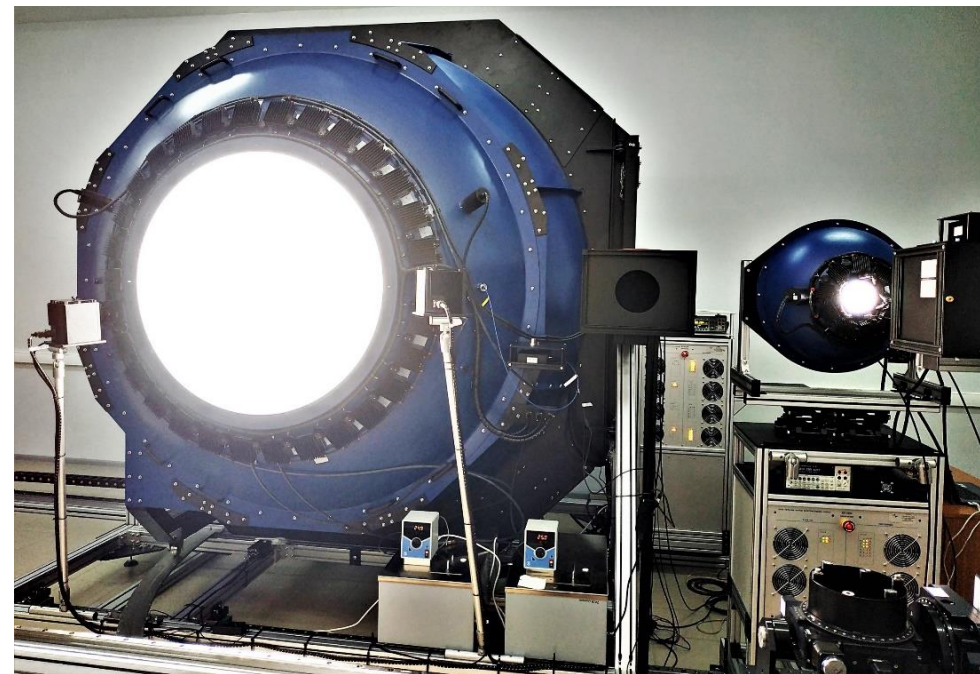
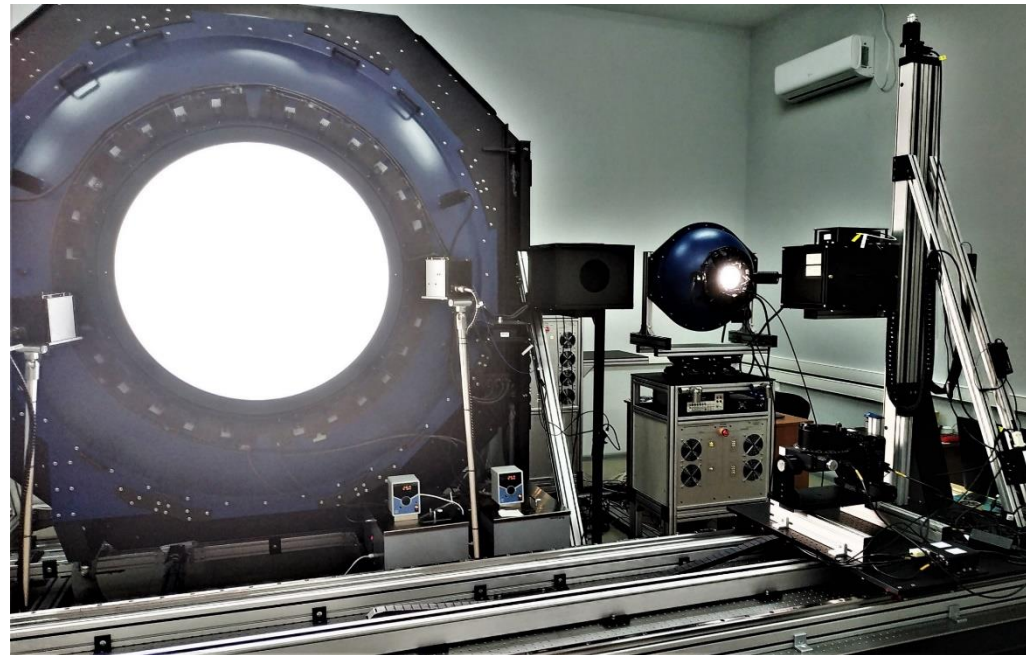
ВНИИОФИ



Состав созданного комплекса

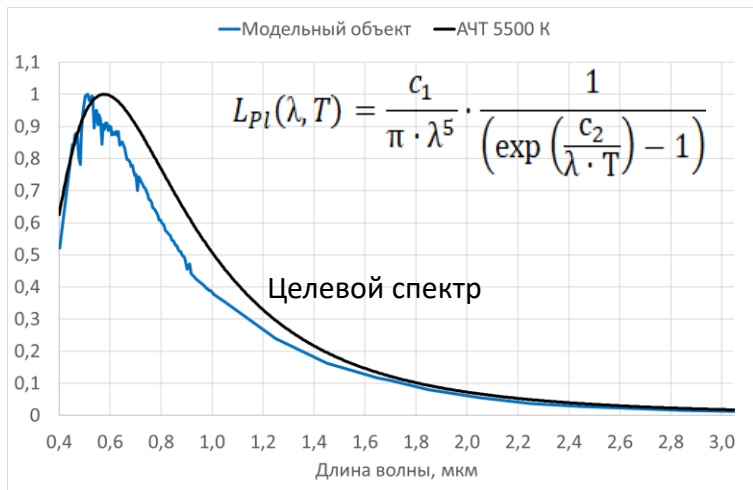
Утвержден в ранге рабочего эталона единицы спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в диапазоне длин волн от 380 до 1050 нм (приказ Росстандарта от 14.04.2026 №724) с прослеживаемостью к ГЭТ 179-2010.

Составная часть	Назначение
Большая интегрирующая сфера (<i>Mulansphere Co.</i>): 1,0;2,5 м (установлена на рельсах)	Абсолютная радиометрическая калибровка оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ. Целевой спектр планковский T=5500 К
Транспортируемая малая интегрирующая сфера: (<i>Mulansphere Co.</i>): 0,1/0,5 м	Передача единицы СПЭЯ от эталонного высокотемпературного черного тела ВВ 3500 в составе первичного эталона ГЭТ 179-2010
Спектрорадиометр (<i>Optosky, ATP5200R</i>) с зеркальным коллиматором (пучок диаметром 50 мм)	Измерения СПЭЯ большой интегрирующей сферы компарированием с малой интегрирующей сферой. Исследования пространственной и угловой однородности СПЭЯ излучения большой интегрирующей сферы
Горизонтальный и вертикальный линейные трансляторы, 2-осевой угловой транслятор	Позиционирование спектрорадиометра при компарировании интегрирующих сфер и исследованиях однородности большой сферы
Спектрорадиометр, установленный на стенке большой интегрирующей сферы	Мониторинг излучения большой интегрирующей сферы при калибровке оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ.

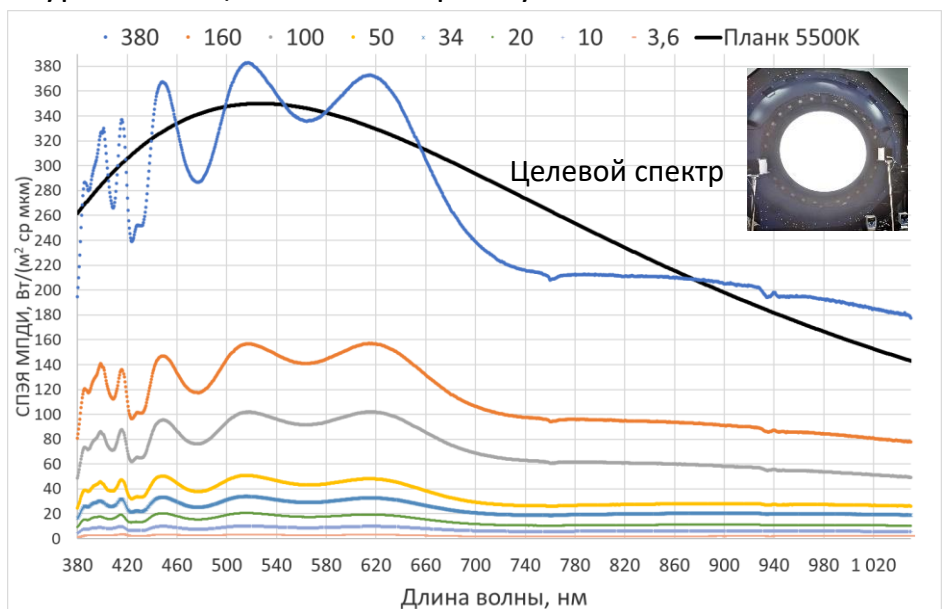


Синтез спектра излучения большой интегрирующей сферы

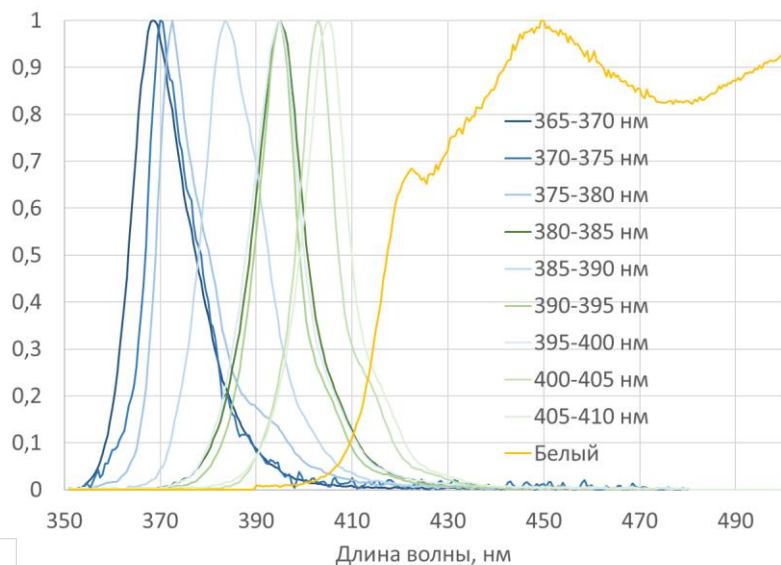
Задача синтеза: получить целевой спектр - спектр излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре 5500 К со значением в максимуме 350 Вт/(м² ср мкм) путем подбора вкладов в излучение УФ, синих светодиодов с различными центральными длинами волн, белых светодиодов и вольфрамовых галогенных ламп



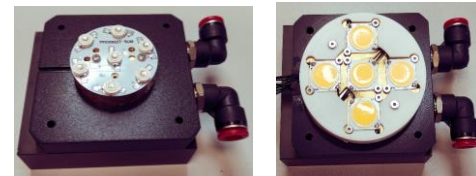
Синтезированный спектр излучения на различных уровнях и целевой спектр излучения



Нормированные спектры излучения светодиодов



Термостабилизированные платформы УФ, синих и белых светодиодов (1 кВт)
Вольфрамовые галогенные лампы различной мощности, в том числе с аттенюатором (1,5 кВт)

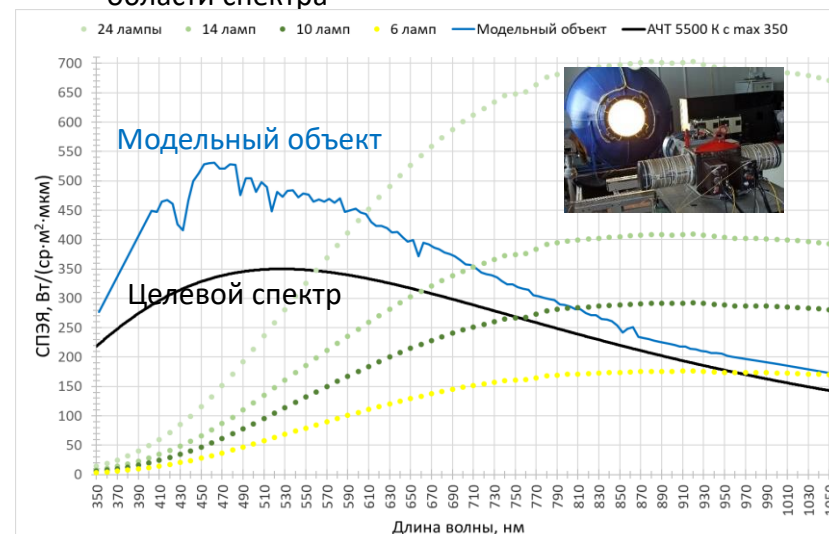
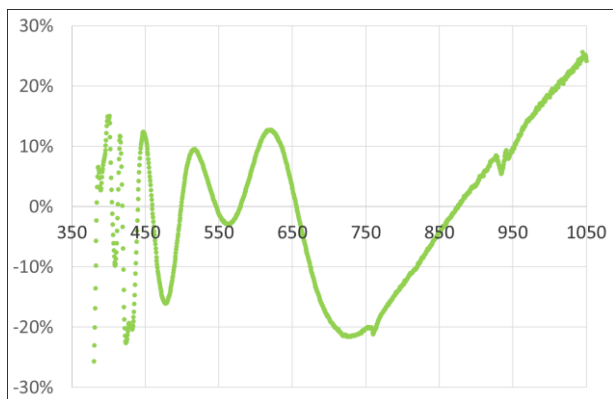


Формула интегрирующей сферы

$$L(\lambda) = \frac{1}{\pi \cdot A_s} \frac{\rho(\lambda) \cdot \Phi(\lambda)}{\left(1 - \rho(\lambda) \cdot \left(1 - \frac{A_a + A_s}{A_s}\right)\right)}$$

Интегрирующая сфера ВНИИОФИ из состава ГЭТ 179-2010: недостаточно излучения в синей области спектра

Относительное отклонение синтезированного от целевого спектра не превышает 30 %



Однородность СПЭЯ большой сферы по выходной апертуре

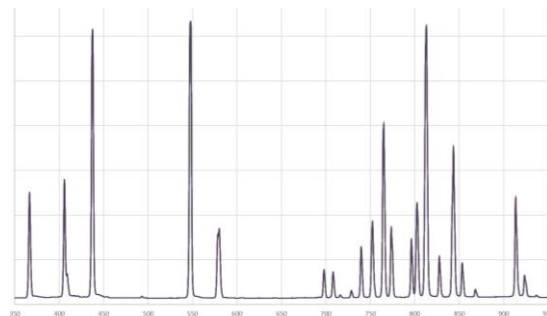
Относительное отклонение СПЭЯ. Уровень 350 Вт/(м²·ср·мкм).

Длина волны $\lambda = 380$ нм. Размах составляет 2,45 %

450							-0,07	-0,24	-0,35	-0,44	-0,56	-0,52	-0,64						
400					0,19	0,26	0,34	-0,04	0,01	0,00	-0,26	-0,38	-0,28	-0,44	-0,77				
350				0,31	0,32	0,53	0,54	0,35	0,32	0,14	0,12	0,02	-0,07	-0,31	-0,44	-0,68	-		
300			0,27	0,24	0,32	0,50	0,33	0,43	0,25	0,30	0,26	0,23	0,20	0,08	-0,22	-0,48	-0,61		
250		-0,05	0,26	0,25	0,11	0,35	0,32	0,35	0,31	0,24	0,32	0,25	0,29	0,07	0,00	-0,24	-0,47	-0,75	
200		0,01	0,24	0,05	0,19	0,36	0,34	0,23	0,29	0,13	0,01	0,17	0,10	0,03	0,03	-0,40	-0,52	-0,43	
150	-0,31	0,03	0,18	0,04	0,20	0,23	0,05	0,06	-0,16	-0,11	-0,26	0,05	-0,02	0,15	-0,09	-0,42	-0,36	-0,23	-0,77
100	-0,39	-0,23	0,00	-0,04	0,03	0,00	0,00	-0,05	-0,10	-0,20	-0,10	-0,12	-0,07	-0,01	-0,21	-0,30	-0,28	-0,25	-0,48
50	-0,60	-0,29	-0,19	0,01	0,09	0,05	0,21	0,11	-0,11	-0,15	0,08	0,01	-0,11	-0,19	-0,04	-0,44	-0,33	-0,16	-0,46
0	-0,62	-0,39	-0,10	0,04	-0,08	-0,01	0,10	0,08	-0,10	0,00	0,18	-0,08	-0,08	-0,15	-0,34	-0,34	-0,46	-0,29	-0,57
-50	-0,45	-0,29	-0,05	-0,04	0,00	-0,03	-0,03	-0,08	-0,17	-0,15	0,02	-0,17	-0,17	-0,08	-0,23	-0,23	-0,47	-0,44	-0,81
-100	-0,56	-0,52	-0,42	-0,14	-0,31	-0,26	-0,39	-0,33	-0,26	-0,21	-0,19	-0,22	-0,22	-0,35	-0,21	-0,26	-0,45	-0,70	-0,84
-150	-1,14	-0,80	-0,75	-0,51	-0,54	-0,52	-0,46	-0,50	-0,40	-0,28	-0,29	-0,51	-0,58	-0,57	-0,51	-0,29	-0,41	-0,68	-1,00
-200		-1,01	-0,80	-0,64	-0,77	-0,79	-0,85	-0,89	-0,79	-0,60	-0,50	-0,70	-0,87	-0,57	-0,52	-0,52	-0,70	-0,95	
-250		-1,17	-1,05	-0,87	-1,07	-1,37	-1,48	-1,09	-0,85	-0,87	-0,66	-0,76	-0,96	-0,83	-0,77	-0,78	-0,92	-1,26	
-300			-1,15	-1,27	-1,38	-1,65	-1,57	-0,99	-0,84	-1,05	-0,88	-0,78	-0,91	-1,00	-0,96	-0,98	-1,34		
-350				-1,50	-1,85	-1,56	-1,21	-1,20	-1,00	-1,03	-1,06	-1,06	-1,20	-1,25	-1,11	-1,53			
-400					-1,77	-1,91	-1,43	-1,17	-1,25	-1,07	-1,11	-1,32	-1,50	-1,49	-1,45				
-450							-1,66	-1,56	-1,42	-1,33	-1,37	-1,62	-1,59						
	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450

Коррекция спектрорадиометров по длине волны

Проведено сканирование
спектрорадиометром набора
линий излучения спектральной
ртутно-аргоновой лампы

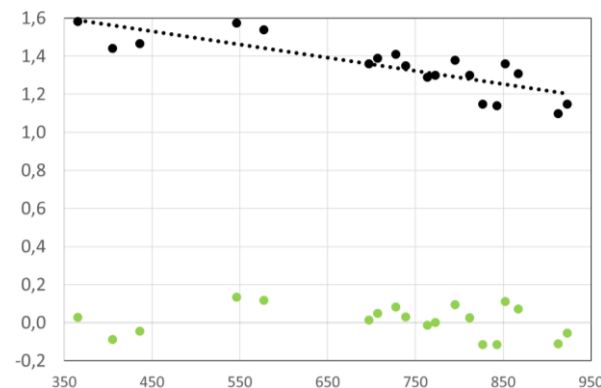


Стабильность большой сферы

Уровень: 184 Вт/(ср м² мкм). Приемник: фотометр.

Вывод: нестабильность не превышает уровня 0,01 %

Относительное отклонение сигнала фотометра



Отклонения по длине
волны (нм) до и после
коррекции

После коррекции отклонения не превышают 0,2 мм

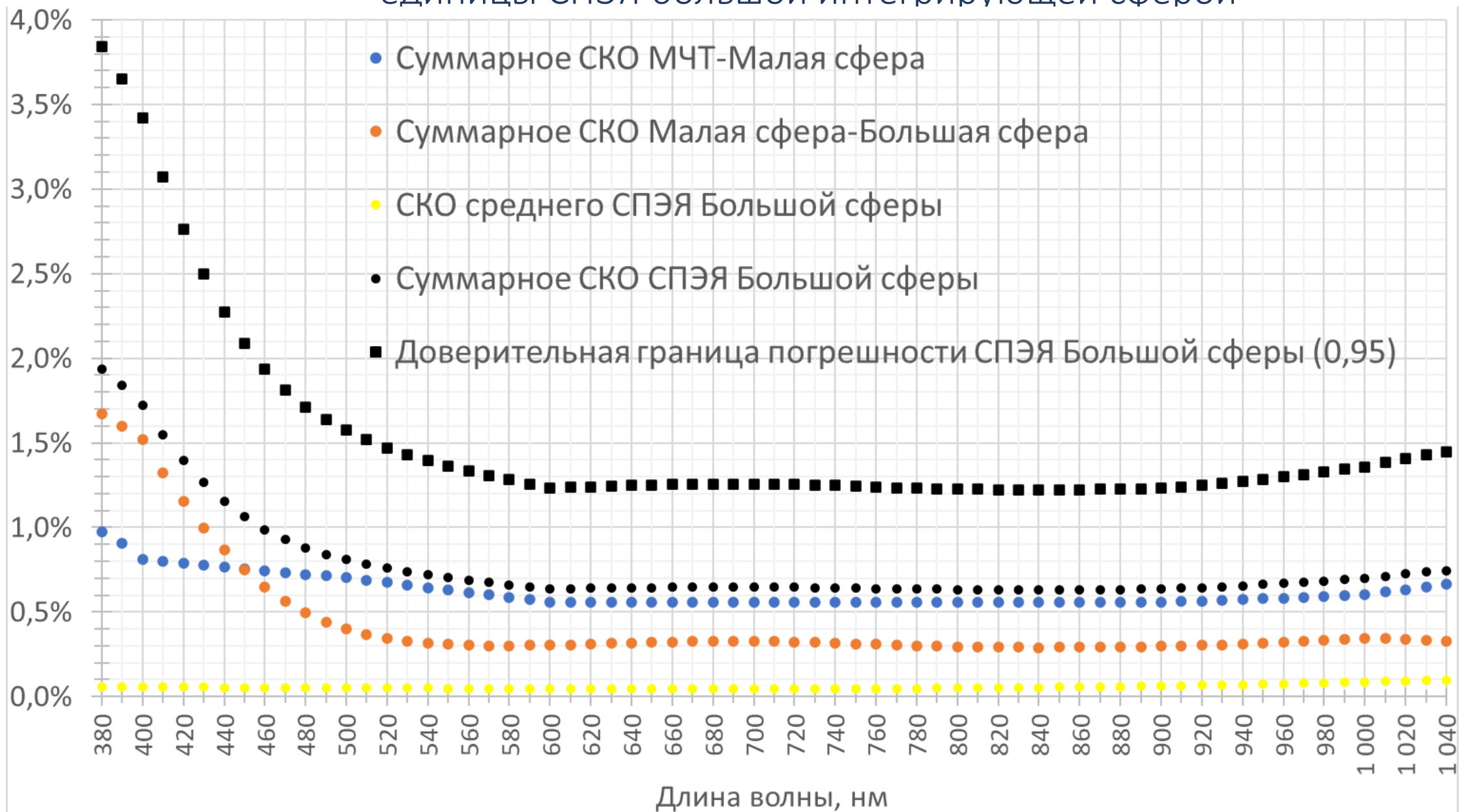


Наименование характеристики	Номинальные значения	
	Нижняя граница	Верхняя граница
Диапазон измерений СПЭЯ в максимуме модельного распределения, Вт/(ср·м ² ·мкм)	не более 3,5	не менее 350
Диапазон измерений СПЭЯ Вт/(ср·м ² ·мкм)	от 1,4 до 360	
Доверительная граница относительной погрешности (p=0,95) воспроизведения СПЭЯ, %, для значений выше 2 Вт/(ср·м ² ·мкм) для значений ниже 2 Вт/(ср·м ² ·мкм)	не более 4,0 не более 7,0	

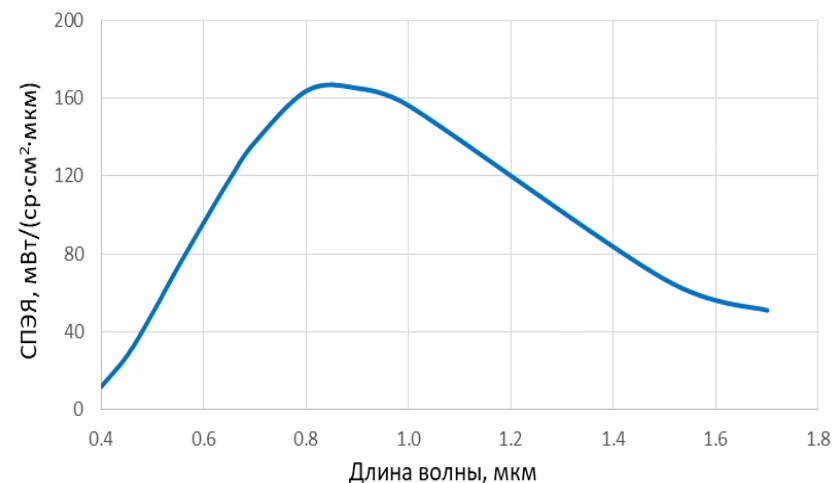
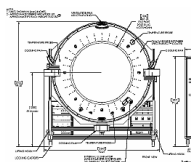
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОНА

Наименование характеристики	Номинальные значения
Диапазон длин волн, нм	от 380 до 1050
Относительная неравномерность (размах) СПЭЯ излучения многоуровневого протяженного диффузного источника на выходной апертуре, не более	3 %
Угловая неравномерность (размах) СПЭЯ излучения МПДИ от среднего значения в диапазоне углов ±8°, не более	3 %
в диапазоне углов ±15°, не более	7 %

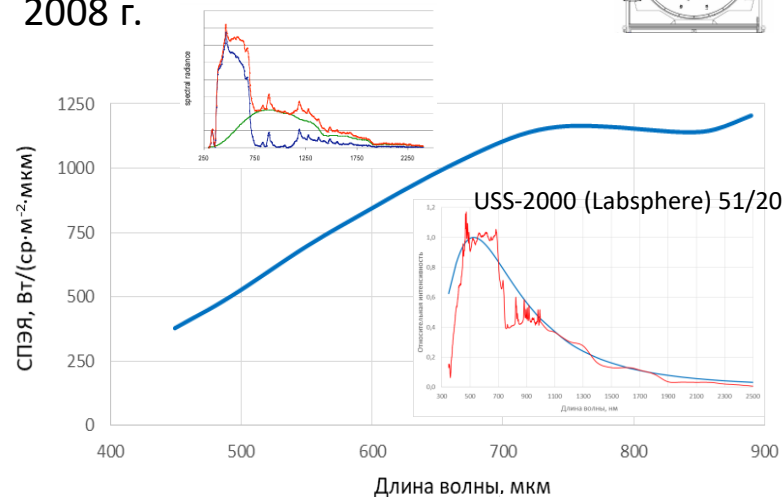
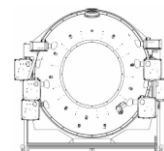
Составляющие доверительной границы погрешности при воспроизведении единицы СПЭЯ большой интегрирующей сферой



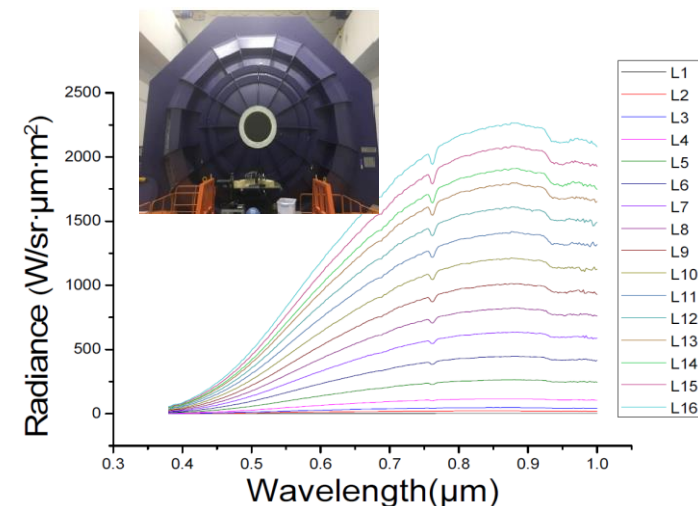
Labsphere (USA) for Indian Space Research Organization. 2007 г.



Labsphere (USA) for Korea Aerospace Research Institute. 2008 г.



Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. 2016 г.



	Индия (Labsphere)	Корея (Labsphere)	Китай	Россия (ПАО КМЗ)
Диаметр внутренней поверхности сферы, м	1,9	2,0	8,0	2,5
Диаметр выходной апертуры, м	1,2	1,0	0,8 / 2,5 / 3,2	1,0
Покрытие внутренней поверхности	Спектрафлект	Спектрафлект	Спектралон	BaSO ₄
Диаметр апертуры : диаметр поверхности	1:1,58	1:2	1:10/1:3,2/1:2,5	1:2,5
Источники излучения	32 ВГЛ (12, 7 кВт)	22 ВГЛ (7,2 кВт), 8 ксеноновых (2,4 кВт)	ВГЛ (80 кВт)	УФ, синие, белые светодиоды (1,0 кВт), ВГЛ(1,5 кВт)
Спектральный диапазон, нм	400 - 1700	350 - 1050	380 - 1050	380 - 1050
Цветовая температура, К	3200	Нет данных	3200	5500
Пространственная однородность, %	>95	>99	>98 для Ø3,2 м	>97
Угловая однородность, %	>97 для ±10°; >94 для ±45°	>98	>88 для ±45°	>97 для ±8° >93 для ±15°
Количество уровней яркости	30	Нет данных	>16	>50

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ