

Информационные характеристики летного образца аппаратуры ИКФС-2

Ф.С. Завелевич¹, Ю.М. Головин¹, Ю.П. Мащицкий¹, А.Г. Никулин¹,
Д.А. Козлов¹, Д.О. Монахов¹, И.А. Козлов¹, И.В. Болмосов¹,
С.А. Архипов², В.А. Целиков², А.С. Романовский³

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,
125438, г. Москва, ул. Онежская, 8
E-mail: zavelevich@kerc.msk.ru

² ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»
143400, Московская область, г. Красногорск-7, ул. Речная, 8
E-mail: dunkel@zenit-kmz.ru

³ НИИ информатики и систем управления при МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5
E-mail: roman@iu6-31.bmstu.ru

Наземная калибровка прибора ИКФС-2 связана с определением всех параметров и характеристик прибора, связывающих измеряемые прибором интерферограммы с истинным спектром входного излучения, и проводится на основе регистрации излучения тестовых объектов (эталонное черное тело с изменяемой в широком диапазоне температурой; монохроматическое излучение лазерных источников). На основании результатов калибровочных испытаний, проведенных на стенде СТВИ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», были получены основные выходные характеристики летного образца прибора (пороговая спектральная яркость, погрешность радиометрической калибровки, форма аппаратной функции, спектральное разрешение и др). Кроме того, были проведены измерения нисходящих спектров излучения атмосферы для сопоставления с результатами расчетов и данными радиозондовых измерений.

Ключевые слова: бортовой фурье-спектрометр ИКФС-2, радиометрическая и спектральная калибровка, аппаратная функция, измерение спектров атмосферы.

Введение

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и служит для обеспечения нужд глобальной и региональной оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере, общее содержание и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. Прибор ИКФС-2 разрабатывается в составе космического аппарата «Метеор-М» №2 (солнечно-синхронная орбита, средняя высота 835 км), запуск которого ожидается в конце 2012 г. К настоящему моменту уже изготовлен, прошел наземную отработку и поставлен Заказчику (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ») летный образец прибора. В таблице 1 представлены основные характеристики разрабатываемого изделия в соответствии с требованиями технического задания.

Таблица 1. Технические характеристики ИКФС-2

Рабочий спектральный диапазон	5...15 мкм (667...2000 см ⁻¹)			
Спектральное разрешение	0.4 см ⁻¹			
Порог обнаружения (NESR) [Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·см], не более:	λ=6 мкм	λ=13 мкм	λ=15 мкм	
	3·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	
Погрешность измерения спектр. яркости объекта	0.5 К			
Угловой диаметр поля зрения по уровню 0.5 (или пространственное разрешение в надире)	не более 40 мрад 33 км			
Полоса обзора / шаг сканирования, не более, км	2500	2000	1500	1000
	110	103	87	73
Периодичность получения интерферограмм	0.6 с			
Информативность	600 кбит/с			
Масса прибора	55 кг			
Энергопотребление	режим рабочий		50 Вт	
	режим дегазации		120 Вт	

Радиометрическая калибровка

Результатом фурье-преобразования регистрируемой прибором интерферограммы $I(x)$ является комплексный спектр $S(\nu)$, который в процессе радиометрической калибровки преобразуется в истинный спектр объекта наблюдения $L(\nu)$, выраженный в единицах спектральной плотности энергетической яркости [Вт·м⁻²·ср⁻¹·см]. Для этого в рабочем режиме на орбите периодически проводятся измерения спектров двух опорных источников: бортового черного тела и холодного космоса. В результате радиометрической калибровки исключаются:

- спектральная чувствительность прибора (включая спектральное пропускание оптической системы, вольт-ваттную чувствительность детектора и др.);
- собственное излучение прибора, обусловленное, в первую очередь, излучением светоделиителя и объектива прибора;
- фазовая дисперсия, обусловленная, например, разнотолщинностью светоделительной и компенсаторной пластин, а также фазочастотными характеристиками электронного тракта;
- ортогональный шум (на этапе взятия действительной части комплексного выражения).

Основными задачами наземной радиометрической калибровки прибора являются характеристика и коррекция нелинейности фотоприемного устройства, а также определение спектральной яркости излучения бортового черного тела. Ранее в работах [1, 2] авторами была подробно изложена методика радиометрической калибровки прибора ИКФС-2, представлен стенд для проведения калибровочных испытаний в вакуумной камере, а также приведены полученные результаты для образцов ТО (технологический) и При (для предварительных испытаний). Далее будут представлены результаты радиометрической калибровки летного образца.

На рис. 1 приведены модули измеренных комплексных спектров эталонного черного тела при его различных температурах (от -20 до $+50^{\circ}\text{C}$), а на рис. 2 – модули спектров опорных источников. Исходная погрешность определения яркостной температуры эталонного черного тела прибором (в предположении линейности фотоприемного тракта и без учета зависимости излучательной способности бортового черного тела от волнового числа) ожидаемо составила несколько градусов (рис. 3). Тем не менее, после применения ранее отработанной [1] процедуры калибровки, включающей определение коэффициентов нелинейности фотоприемника и излучательной способности бортового черного тела, остаточная погрешность радиометрической калибровки (систематическая составляющая радиометрической точности) составила не более 0.5 K для всего измеряемого диапазона температур объекта $250\dots 323\text{ K}$ (рис. 4).

На рис. 5 представлены измеренные результаты пороговой спектральной яркости летного образца ИКФС-2 (случайная составляющая радиометрической погрешности, радиометрический шум). Как видно, соответствие ТЗ имеет место во всем рабочем спектральном диапазоне за исключением полосы вблизи 6.4 мкм , наличие которой обусловлено сильным поглощением в просветляющих покрытиях. Применяемые многослойные покрытия в качестве материала с низким показателем преломления используют фториды, при нанесении которых не удается полностью обеспечить отсутствие влаги. В связи с этим использование спектральных каналов вблизи 6.4 мкм становится ограниченным.

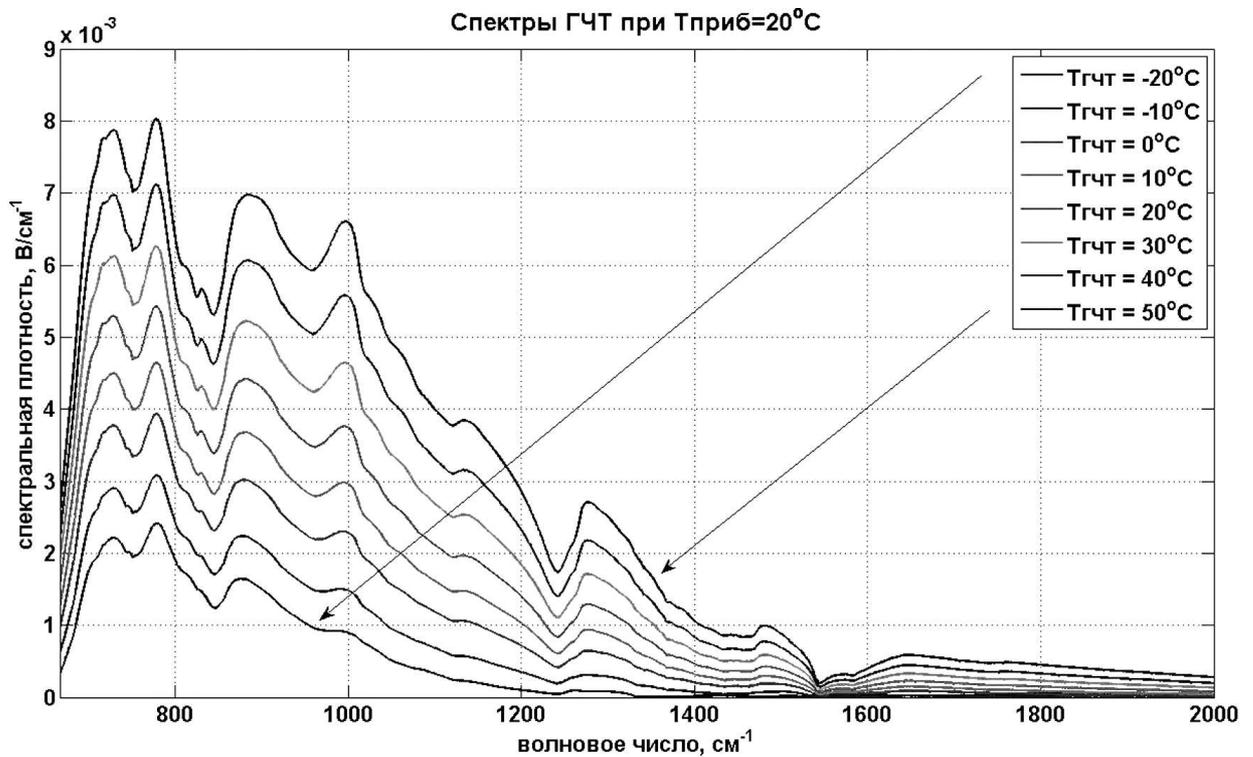


Рис. 1. Спектры эталонного черного тела, измеренные при радиометрической калибровке летного образца

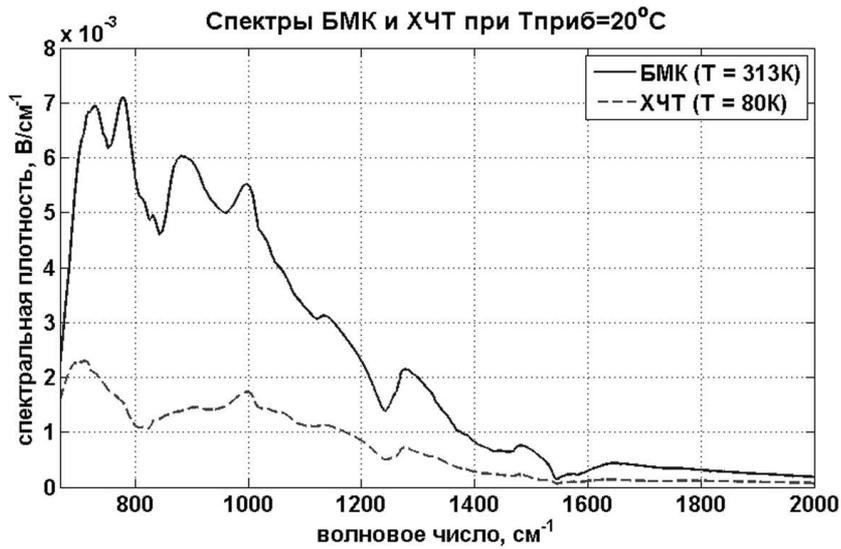


Рис. 2. Спектры опорных источников

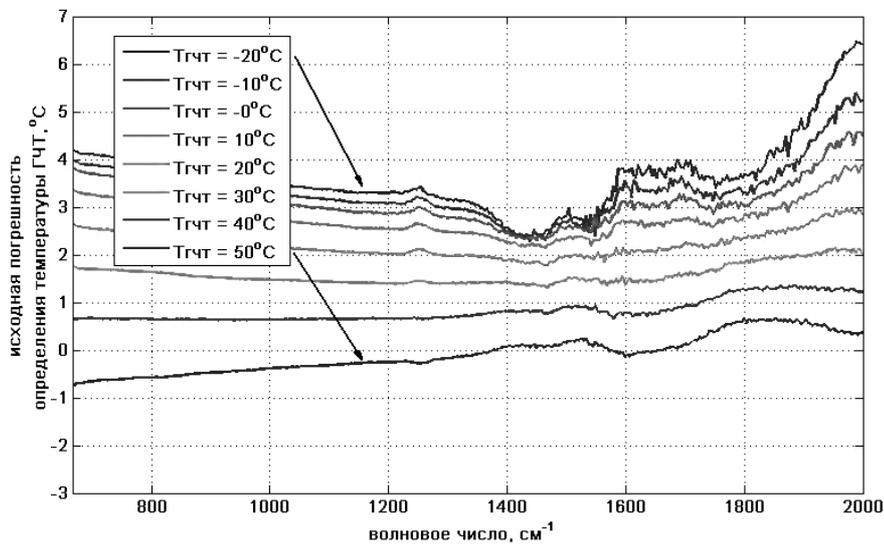


Рис. 3. Исходная погрешность определения спектральной яркости объекта

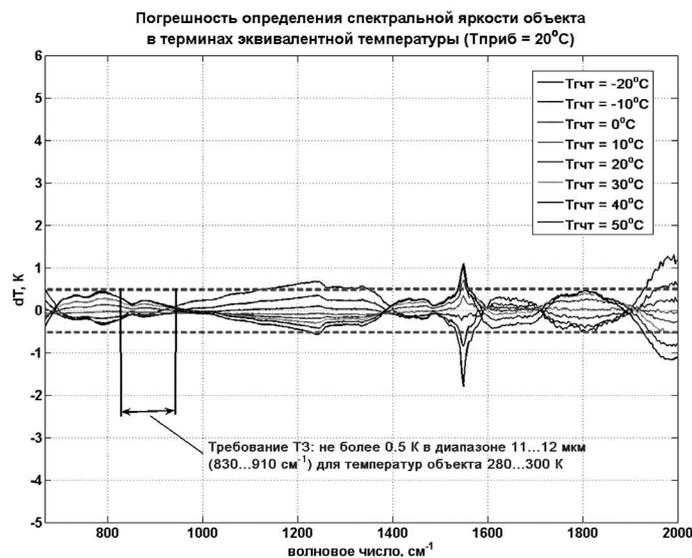


Рис. 4. Остаточная погрешность определения спектральной яркости объекта



Рис. 5. Пороговая спектральная яркость $NESR(\nu)$

Спектральная калибровка

Основными задачами спектральной калибровки являются:

- 1) точное определение шкалы волновых чисел в измеряемых спектрах;
- 2) точная характеристика формы аппаратной функции (спектрального отклика на входное монохроматическое воздействие).

Краткое описание используемой в ИКФС-2 методики привязки измеряемых спектров к шкале волновых чисел приводится в [1]. В настоящей работе представлены результаты измерения аппаратной функции для летного образца прибора на двух длинах волн и моделирование её формы для всего рабочего спектрального диапазона.

Результаты измерения аппаратной функции

Аппаратная функция фурье-спектрометра $A(\nu; \nu_0)$ определяется как спектральный отклик прибора на входное монохроматическое излучение ν_0 . В качестве источника излучения используются CO_2 -лазер (линия вблизи 10.3 мкм) и HeNe-лазер (линия вблизи 5.4 мкм), «подсвечивающие» либо диффузно отражающую плоскую мишень, расположенную в фокальной плоскости коллиматора, либо интегрирующую сферу (модель LabSphere с покрытием InfraGold). При этом важно обеспечить равномерное распределение яркости в пределах поля зрения прибора. Для исключения фоновой засветки последовательно измеряются интерферограммы сначала с «включенным», а затем с «выключенным» лазерным источником. Анализируя результаты измерения, представленные на рис. 6, обратим внимание на следующее:

- 1) ширина аппаратной функции по уровню 0.5: 0.39 см^{-1} для CO_2 -лазера и 0.47 см^{-1} для HeNe-лазера;
- 2) сдвиг положения максимума линии в сторону меньших волновых чисел: 0.119 см^{-1} для линии CO_2 -лазера и 0.184 см^{-1} для линии HeNe-лазера;

3) форма линии спектрального отклика ассиметрична относительно положения максимума (следствие протяженного источника излучения);

4) спектральный отклик имеет незначительную мнимую составляющую (следствие несимметричности огибающей и фазы ИФГ относительно положения НРХ).

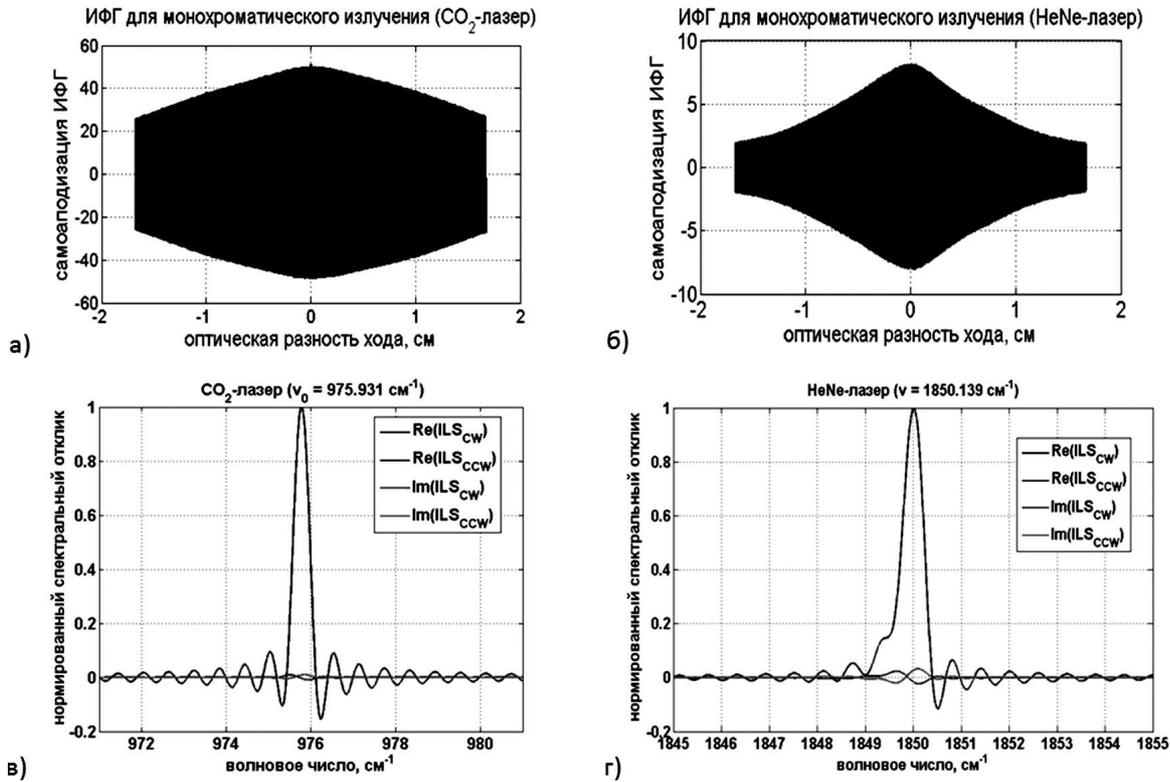


Рис. 6. Результаты измерения спектрального отклика для CO_2 - и He-Ne-лазеров
а, б – огибающие ИФГ; в, г – аппаратная функция

Моделирование результатов измерения аппаратной функции

Можно выделить следующие факторы, определяющие форму аппаратной функции фурье-спектрометра:

- 1) ограничение диапазона изменения разности хода;
- 2) угловая чувствительность (весовая функция по отношению к предметным углам); включает в себя размеры и форму чувствительной площадки; распределение чувствительности по площадке ФП; дефокусировку ФП (продольную и поперечную); виньетирование в оптической системе; aberrации оптической системы;
- 3) остаточная разъюстировка интерферометра (зависимость взаимного бокового сдвига вершин уголкового отражателей от разности хода);
- 4) нестабильность скорости изменения оптической разности хода.

Первый фактор – ограничение диапазона изменения разности хода приводит к «sinc»-образной форме АФ с шириной $1.21/2L$, где L – максимальная оптическая разность хода в интерферометре. Второй фактор – угловая чувствительность – является комплексным, однако может быть непосредственно измерен (рис. 7). Влияние четвертого фактора – нестабильности скорости изменения ОРХ – при малых флуктуациях скорости и согласованности задержек основного и референтного каналов является пренебрежимо малым. Поэтому про-

цесс моделирования представляет собой определение траектории взаимного перемещения вершин угольных отражателей, при этом можно показать, что для механизма изменения разности хода типа «двойной маятник» допустимо линейное приближение. Следует отметить, что определение данной траектории экспериментальным путем возможно только при использовании многоплощадного фотоприемника [3].

Результаты моделирования аппаратной функции представлены на рис. 7. Следует подчеркнуть, что благодаря полученной модели форма аппаратной функции известна во всем рабочем спектральном диапазоне, что необходимо для проведения последующей тематической обработки измеряемых спектров атмосферы. В частности, на рис. 7 внизу показана расчетная форма аппаратной функции для границ рабочего спектрального диапазона 5 и 15 мкм.

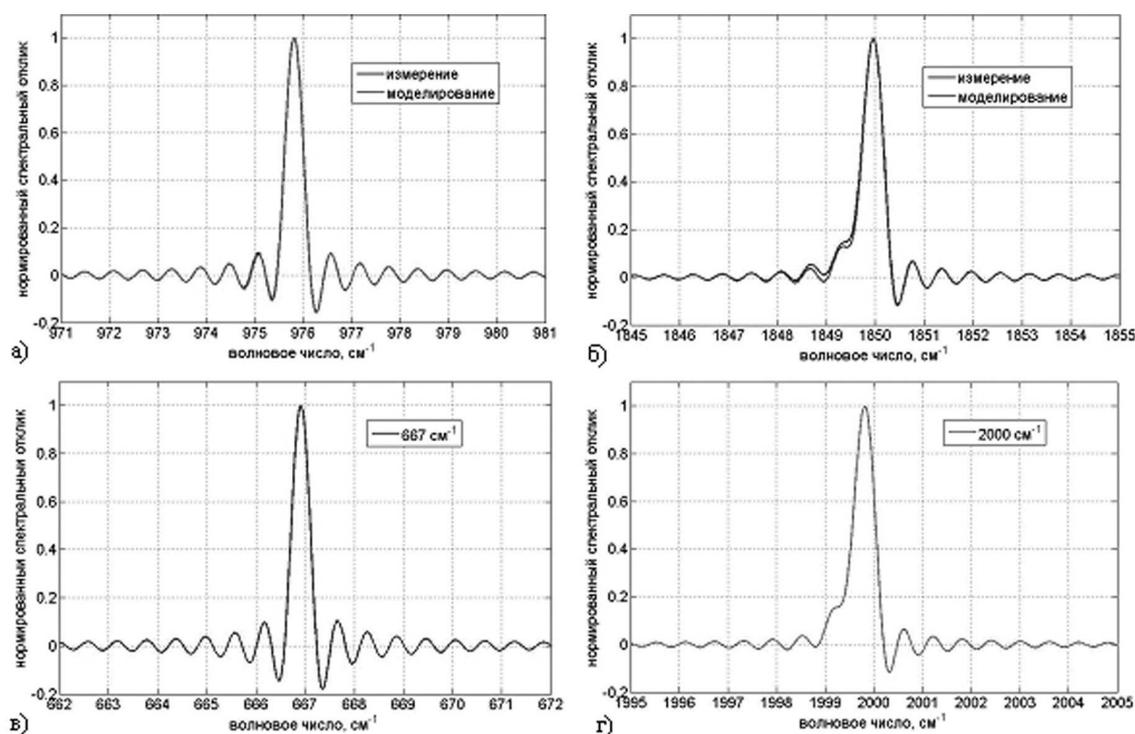


Рис. 7. Моделирование аппаратной функции

Измерение угловой чувствительности

Измерение угловой чувствительности прибора проводилось при перемещении точечного источника с температурой $T = 1000$ К по 2-м координатам в предметной плоскости на расстоянии 10 м. Результаты измерений представлены на рис. 8. Угол, соответствующий половине чувствительности в максимуме, равен 30 мрад, что соответствует величине пиксела в надире 25 км.

Измерение спектров атмосферы

Для демонстрации точностных характеристик прибора были проведены измерения спектров нисходящего излучения атмосферы для сопоставления с результатами моделирования. Расчет проводился методом «line-by-line» с использованием данных радиозондиро-

вания полей температуры и влажности вблизи района измерений, при этом профиль озона был выбран стандартным. Измерения проводились с 15:00 до 18:00 27 апреля 2011 г. В качестве калибровочных источников использовались бортовой модуль калибровки при температуре 40°C и эталонное черное тело при $T=10^{\circ}\text{C}$. При калибровке учитывалось излучение и поглощение паров воды и CO_2 , содержащихся на трассе «источник излучения – входное окно прибора». На рис. 9 представлены исходные данные для моделирования (вертикальные профили T , RH и O_3), а на рис. 10 – результаты сравнения измеренного и моделируемого спектров в различных областях рабочего спектрального диапазона. На рис. 10а видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных спектров атмосферы вблизи центра полосы поглощения CO_2 (667 см^{-1}). Различие яркостных температур в этой области составляет не более 0,5 К (рис. 10б). Удовлетворительное совпадение также имеет место в области полосы поглощения озона 1000-1050 см^{-1} (рис. 10в). В то же время наблюдается различие сплошной составляющей в областях 750-1000 см^{-1} и 1600-1850 см^{-1} (рис. 10г,е). Одной из причин различия наблюдаемого и рассчитанного спектров является отсутствие данных радиозондирования непосредственно в месте проведения измерений.

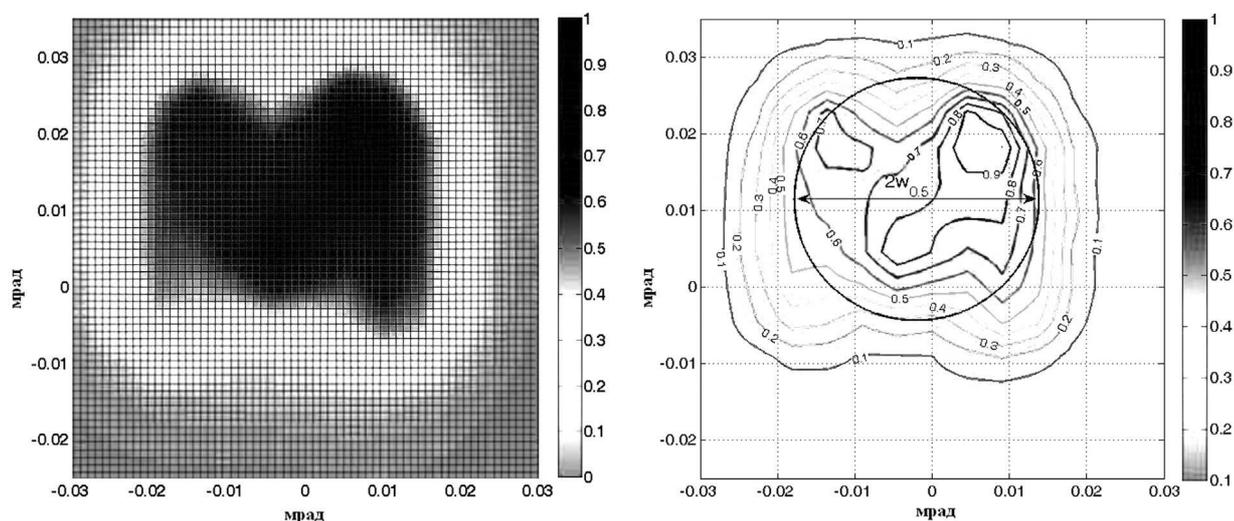


Рис. 8. Измеренное распределение угловой чувствительности прибора

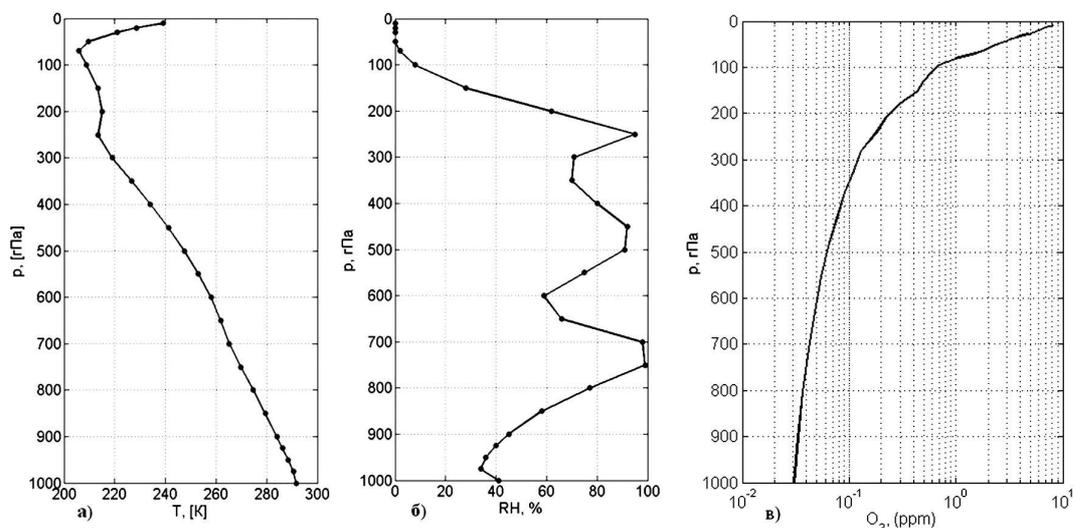


Рис. 9. Исходные данные для моделирования – вертикальные профили температуры (а), влажности (б), концентрации озона (в)

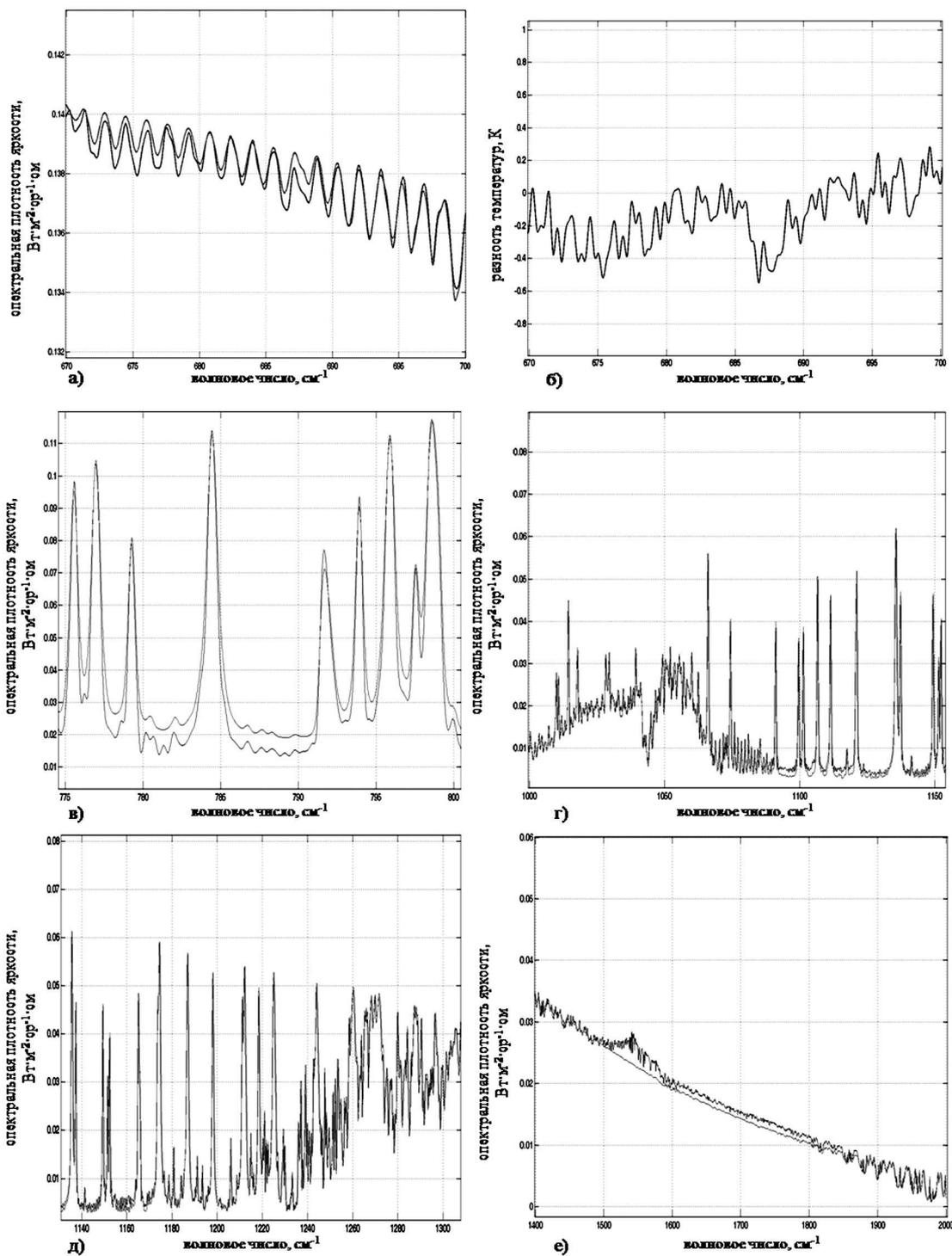


Рис. 10. Измеренный (синий) и моделируемый (красный) спектры атмосферы

Заключение

В ходе калибровки были получены основные параметры и характеристики летного образца прибора ИКФС-2, обеспечивающие или подтверждающие требуемую точность измеряемых прибором спектров. Были проведены измерения спектров нисходящего излучения атмосферы для сопоставления с результатами моделирования, выполненного на основе

радиозондовых измерений. В настоящий момент проводится более тщательный анализ полученных результатов, учитывающий, в частности, форму спектрального отклика (аппаратную функцию) прибора во всем рабочем спектральном диапазоне.

Литература

1. Десятов А.В., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С. и др. Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т.7. №2. С.241-248.
2. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. и др. Технологический образец бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6. №1. С.259-267.
3. Henault F., Hebert P.-J., Lecchini C., Miras D. Geometrical misalignment retrieval of the IASI interferometer // Proc. SPIE 3870, 159. 1999.

Performance of IKFS-2 flight model

**F. Zavelevich¹, Yu. Golovin¹, Yu. Matsitsky¹, A. Nikulin¹,
D. Kozlov¹, D. Monakhov¹, I. Kozlov¹, I. Bolmosov¹,
S. Arkhipov², V. Tselikov², A. Romanovsky³**

¹ *Keldysh Research Center,
125438, Moscow, Onejskaya str., 8
E-mail: zavelevich@kerc.msk.ru*

² *JSC «Krasnogorsky Zavod»
143400, Moscow region, Krasnogorsk-7, Rechnaya str., 8
E-mail: dunkel@zenit.istra.ru*

³ *Research Institute of Informatics and Control Systems
(attached to MSTU named after Bauman)
105005, Moscow, 2-nd Baumanskaya str., 5
E-mail: roman@iu6-31.bmstu.ru*

IKFS-2 ground calibration is related to the characterization of all parameters and characteristics needed to convert the raw interferogram into the input spectral radiance with required accuracy. As a result of thermal vacuum tests, detector/preamp nonlinearity and internal calibration target spectral radiance were measured, after that systematic radiometric error and noise equivalent spectral radiance (NESR) were obtained. IKFS-2 instrument line shape was measured as the spectral response of the instrument to a monochromatic radiation of CO₂-laser (10.3 μm) and HeNe-laser (5.4 μm). In addition, measurements of downwelling spectra of atmosphere were conducted and compared with modeled data, based on radiosonde measurements.

Keywords: Fourier-transform spectrometer, radiometric and spectral calibration, instrument line shape, atmosphere sounding.