

Новая эталонная база России для радиометрической калибровки оптической аппаратуры наблюдения Земли и оценка возможных уровней точности получаемых радиометрических данных

А.С. Панфилов ¹, В.Р. Гаврилов ¹, В.С. Иванов ¹, В.Н. Крутиков ², Б.Е. Лисянский ¹,
С.П. Морозова ¹, С.А. Огарев ¹, А.В. Пузанов ¹, М.В. Солодилов ¹, Б.Б. Хлевной ¹,
В.И. Саприцкий ¹

*¹Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений
(ВНИИОФИ)*

119361, Москва, ул. Озерная, 46

E-mail: panfilov-m4@mail.ru

²Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии

В 2010 г. утвержден в качестве Государственного первичного специального эталона (ГПСЭ) радиометрический комплекс для обеспечения прецизионной калибровки аппаратуры наблюдения Земли (АНЗ), разработанный ВНИИОФИ в 2006–2009 годах. Он реализован в виде двух установок в спектральных диапазонах (0,3–3) мкм и (3–25) мкм. Представлены основные характеристики эталона и поверочная схема для средств измерений радиометрических величин. Использование ГПСЭ позволит существенно повысить точность радиометрической калибровки АНЗ. Определены направления дальнейших работ по созданию системы метрологического обеспечения разработки и эксплуатации АНЗ.

Ключевые слова: эталон, поверочная схема, аппаратура наблюдения Земли, радиометрическая калибровка, яркость, спектральная чувствительность, точность, неопределенность

Введение

Существенные проблемы стендовой базы радиометрической калибровки российской спутниковой аппаратуры наблюдения Земли (АНЗ) привели к постановке во ФГУП «ВНИИОФИ» в 2006 г. работы по созданию эталонного радиометрического комплекса для обеспечения прецизионной калибровки АНЗ (Панфилов и др., 2008). Такой комплекс был разработан в 2006–2009 годах. В результате проведенных метрологических исследований продемонстрирован его высокий научно-технический уровень, соответствующий мировым стандартам. В 2010 г. комплекс прошел процедуру утверждения в качестве Государственного первичного специального эталона (ГПСЭ), который хранится во ФГУП «ВНИИОФИ».

Ниже дано описание ГПСЭ и представлены его характеристики, позволяющие значительно повысить точность радиометрической калибровки АНЗ. Даны предложения по дальнейшему совершенствованию системы метрологического обеспечения наземной калибровки АНЗ.

Состав и описание эталона

ГПСЭ предназначен для воспроизведения и хранения единицы спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в диапазоне длин волн (0,3–25) мкм и относительного спектрального распределения мощности излучения в диапазоне длин волн (0,3–3,0) мкм, а

также передачи размера единиц вторичным и рабочим эталонам и рабочим средствам измерений. Эталон реализован в виде двух установок в спектральных диапазонах: I - (0,3–3) мкм и II - (3–25) мкм, изображенных в самом общем виде на рис. 1.

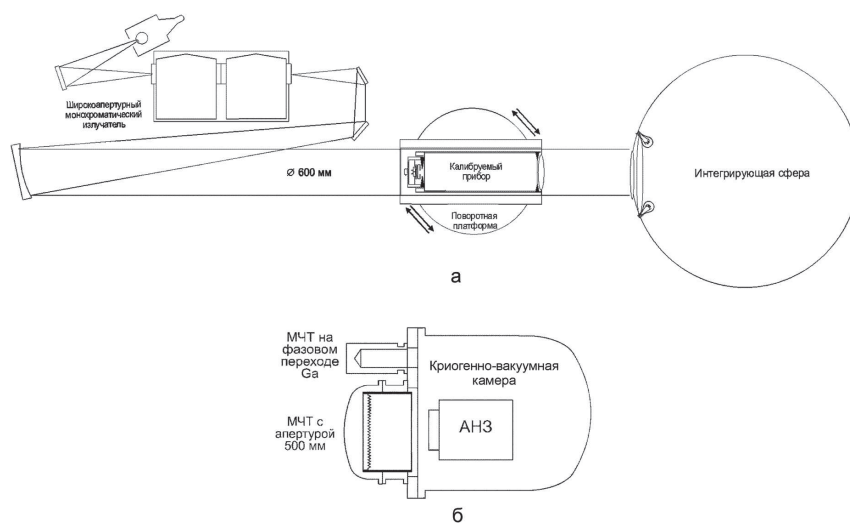


Рис.1. Схемы радиометрической калибровки АНЗ:
 а) в диапазоне 0,3-3 мкм,
 б) в диапазоне 3-25 мкм

В диапазоне I воспроизведение единицы СПЭЯ производится с помощью протяженного источника диффузного излучения, а единицы относительного спектрального распределения мощности излучения с помощью протяженного источника монохроматического излучения.

Протяженный источник диффузного излучения выполнен в виде интегрирующей сферы (ИС) диаметром 2 м с выходным отверстием 600 мм, по периметру которого с внутренней стороны сферы расположены 24 вольфрамовых галогенных лампы накаливания мощностью 150 Вт каждая. ИС воспроизводит 24 уровня СПЭЯ в диапазоне $(6 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^8)$ Вт/(м³ср). Точность воспроизведения размера единицы СПЭЯ в диапазоне значений $(2 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^8)$ Вт/(м³ср) определяется суммарной стандартной неопределенностью (ССН), не превышающей значений, приведенных в таблице 1 в строке «ИС».

Таблица 1. Суммарная стандартная неопределенность воспроизведения размеров радиометрических единиц в спектральном диапазоне I, %

Длина волны, мкм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,5
«ИС»	1,5	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,3	1,5	1,5
«МИ»	1,71	0,35	0,34	0,33	0,39	0,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76

Исследования пространственной однородности яркости выходной апертуры ИС показало, что максимальная неоднородность, определяемая как отклонение от среднего значения, составляет (0,2-0,4) %.

Калибровка ИС осуществляется методом сличения с эталонной моделью черного тела (МЧТ) ВВ3500М, имеющей регулируемую в диапазоне (1800-3300) К температуру, с помощью спектрокомпаратора, состоящего из двойного дифракционного монохроматора, набора приемников излучения и фокусирующей зеркальной оптики. Компаратор собран на устрой-

стве позиционирования, предназначенном для его линейного перемещения и точной установки напротив источников излучения.

В состав протяженного источника монохроматического излучения (МИ) входят ленточная лампа, фокусирующая оптика, двойной дифракционный монохроматор и зеркальный коллиматор с диаметром выходной апертуры 600 мм. Диапазон значений относительного спектрального распределения мощности излучения МИ, в котором воспроизводится единица, составляет 0,001-1. Точность воспроизведения размера единицы определяется ССН, не превышающей значений, приведенных в таблице 1 в строке «МИ». Калибровка МИ производится с использованием эталонных приемников излучения.

Воспроизведение единицы СПЭЯ в диапазоне II осуществляется с помощью протяженного излучателя в виде широкоапертурной МЧТ с диаметром выходной апертуры 500 мм, работающей в диапазоне температур (213–453) К. Воспроизводимый при этом диапазон значений СПЭЯ - $(7,8 \cdot 10^1 - 7,3 \cdot 10^7)$ Вт/(м³ср). Точность воспроизведения размера единицы СПЭЯ для фиксированных значений рабочей температуры МЧТ определяется ССН, не превышающей значений, приведенных в таблице 2.

Таблица 2. Суммарная стандартная неопределенность воспроизведения СПЭЯ в спектральном диапазоне (3-14) мкм, %

Длина волны, мкм	Температура МЧТ, К			
	213	300	350	453
3,0	–	0,85	0,69	0,59
4,0	4,32	0,50	0,38	0,36
6,0	0,73	0,33	0,26	0,32
8,0	0,50	0,24	0,21	0,31
10,0	0,40	0,20	0,18	0,31
12,0	0,34	0,17	0,17	0,30
14,0	0,30	0,15	0,16	0,30

Пространственная однородность энергетической яркости МЧТ, определяемая аналогично ИС, в указанном диапазоне температур находится в пределах 0,1 %.

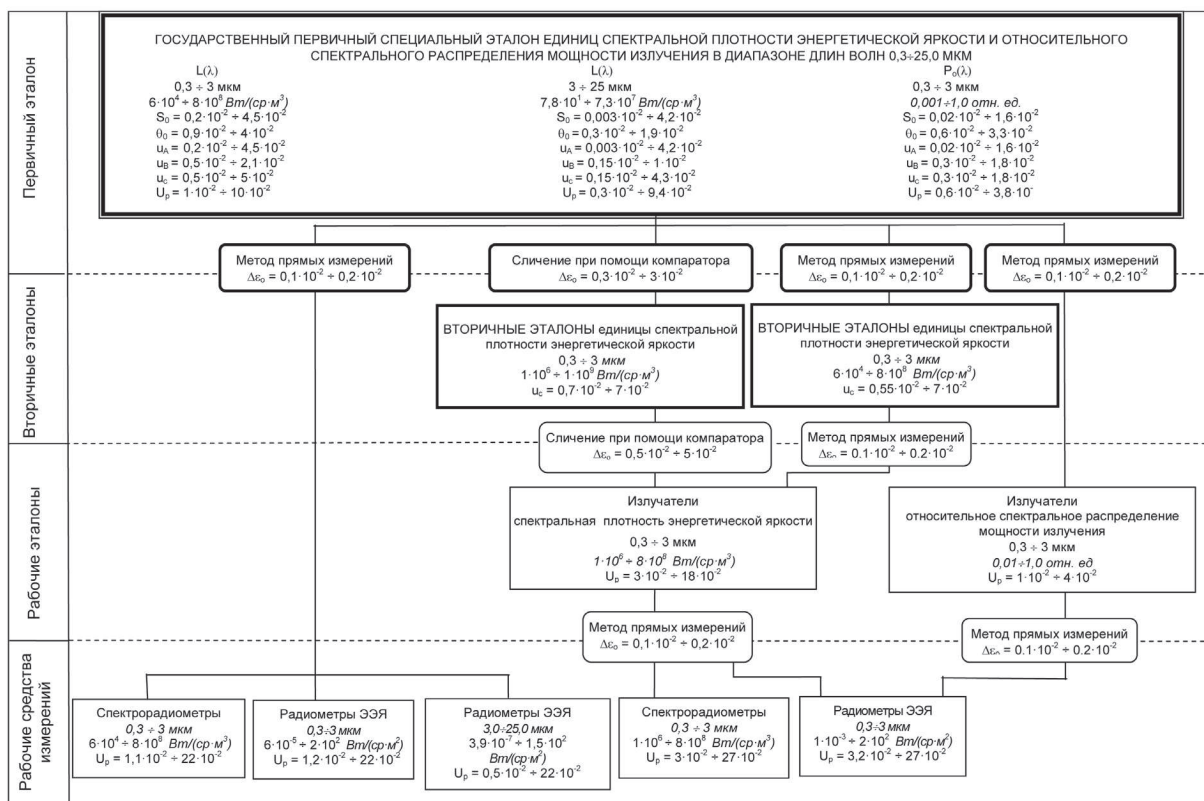
Калибровка широкоапертурной МЧТ должна осуществляться в криогенно-вакуумной камере с помощью эталонной МЧТ на фазовом переходе галлия и фильтрового радиометра, который установлен на подвижной платформе устройства позиционирования.

В состав эталона входят также технические средства для аттестации эталонных излучателей и системы измерения пространственной однородности распределения яркости выходной апертуры эталонных излучателей, обеспечивающие прецизионное воспроизведение радиометрических величин этими излучателями.

Поверочная схема

Подготовлен проект межгосударственного стандарта «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости и относительного спектрального распределения мощности излучения в диапазоне длин волн 0,3-25,0 мкм», который будет действовать параллельно с обновленной редакцией ГОСТа 8.195 – 89 (ГОСТ 8.195-89, 1989). Все

излучатели нового первичного эталона, в отличие от старого, являются, как было показано выше, протяженными. На рис. 2 представлена разработанная поверочная схема. Применительно к тематике данной работы рассмотрим рабочие средства измерений, входящие в нее. Это спектрорадиометры и радиометры эффективной энергетической яркости (ЭЭЯ) $L = \int_0^{\infty} L(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda$ (λ – длина волны, $L(\lambda)$ – СПЭЯ на входе радиометра и $\bar{S}(\lambda)$ – его относительная спектральная чувствительность), к которым относится оптическая АНЗ (Панфилов, 2002; Панфилов и др., 2009). Соответственно измеряемыми величинами являются СПЭЯ и ЭЭЯ и основные операции при радиометрической калибровке АНЗ – это измерение ее относительных спектральных характеристик и сигналов на выходе N от излучения эталонного протяженного диффузного излучателя со СПЭЯ $L_s(\lambda)$. При этом точность калибровки характеризуется расширенной неопределенностью U_p (Guide, 1993; РМГ 43-2001, 2001) коэффициентов $\kappa_\lambda = N / L_s(\lambda)$ или $\kappa = N / \int_0^{\infty} L_s(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda$.



Обозначения: $L(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости; $P_r(\lambda)$ – относительное спектральное распределение мощности излучения; ЭЭЯ – эффективная энергетическая яркость; S_0 – среднее квадратическое отклонение; θ_0 – неисключенная систематическая погрешность; u – неопределенности: по типу А – u_A , по типу В – u_B , суммарная стандартная неопределенность – u_C , расширенная неопределенность – U_p ; ϵ_0 – погрешность метода передачи размера единиц

Рис. 2. Поверочная схема

Указанные в поверочной схеме диапазоны значений ЭЭЯ получены с учетом $L_{min}(\lambda)$ и

$L_{max}(\lambda)$ наблюдаемых объектов и всех типов АНЗ по спектральной чувствительности $\bar{S}(\lambda)$ – от спектрорадиометрической до панхроматической. Соответствующие им значения U_p даны с учетом оценок неопределенности ЭЭЯ или СПЭЯ и значений отношения сигнал/шум АНЗ 1000 и 10 соответственно для максимальной и минимальной яркости на входе аппаратуры. Оценки неопределенности ЭЭЯ получены для эквивалентных длин волн в j -х спектральных зонах чувствительности АНЗ $\lambda_{e,j} = \int_0^{\infty} \lambda \bar{S}_j(\lambda) L(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} \bar{S}_j(\lambda) L(\lambda) d\lambda$, согласно используемому на практике (Панфилов, 2002) способу перехода от измеряемых зна-

чений ЭЭЯ L_j к СПЭЯ $L_j(\lambda) = L_j/\Delta\lambda_{e,j}$, где $\Delta\lambda_{e,j} = \int_0^\infty \overline{S_j}(\lambda) d\lambda$ – эквивалентная ширина j -ой спектральной зоны. Более точные оценки неопределенности измерения ЭЭЯ (без перехода к $L_j(\lambda)$) могут быть получены на основе экспериментальных данных радиометрической калибровки АНЗ с использованием метода распространения неопределенности (Ковальский В.Я., Самойлов Л.Н., 1979), а также метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) как одного из методов распространения распределений (Кокс М., Харрис П., 2005).

Существенным моментом является возможность передачи размеров единиц радиометрических величин на АНЗ как от рабочих эталонов, так и с более высокой точностью непосредственно от ГПСЭ. Это отражено в поверочной схеме. В соответствии с ней максимальная точность калибровки АНЗ с применением ГПСЭ в спектральном диапазоне I характеризуется ССН $\sim 0,5\%$. Это значительно лучше варианта использования рабочих эталонов и примерно на порядок лучше результатов, получаемых по старой схеме ГОСТ 8.195-89 (Панфилов и др., 2009).

Помимо измерения относительных спектральных характеристик АНЗ и передачи размера единицы СПЭЯ, ГПСЭ позволяет измерять следующие характеристики АНЗ: градуировочные, пространственную равномерность чувствительности, значения отношения сигнал/шум при различных уровнях входного сигнала.

Направления дальнейших работ

В систему метрологического обеспечения создания АНЗ, кроме первичного эталона, должны также входить вторичные и рабочие эталоны. Помимо радиометрической калибровки рабочие эталоны нужны для настройки, регулировки и проведения испытаний аппаратуры. Они разрабатываются в соответствии с практическими потребностями. В настоящее время такая потребность есть в рабочих эталонах для разработки перспективной АНЗ с диаметром входных зрачков более 600 мм. Учитывая это, ФГУП «ВНИИОФИ» и ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» провели предварительную проработку создания эталонного радиометрического комплекса для калибровки крупногабаритной АНЗ в диапазоне длин волн 0,35–2,5 мкм с использованием производственной базы ОАО и эталонной базы ВНИИОФИ (Крутиков В.Н., 2010). Дополнительно потребуется разработка эталонов для передачи размеров единиц радиометрических величин от первичного эталона рабочим, входящим в состав комплекса.

Создание низкотемпературной широкоапертурной МЧТ в составе ГПСЭ следует рассматривать как первый этап решения задачи разработки установки для прецизионной калибровки спутниковой инфракрасной аппаратуры с входными зрачками до 500 мм в спектральном диапазоне II в низкофоновых условиях, соответствующих условиям штатной эксплуатации АНЗ. Так как у ВНИИОФИ нет большой криогенно-вакуумной камеры, необходимой для создания современной калибровочной установки, принято совместное решение ЦНИИмаш и ВНИИОФИ о создании эталонной установки на базе высоковакуумного стенда «Квант-20» ЦНИИмаш (диаметр и длина камеры ~ 2 и 6 м) и эталонных излучателей ВНИИОФИ (Крутиков В.Н., 2010).

Крупным недостатком калибровки отечественной инфракрасной спутниковой аппаратуры является отсутствие измерений относительных спектральных характеристик чувстви-

тельности АНЗ. Получение их расчетным путем и дальнейшее использование для расчета ЭЭЯ приводит к существенному снижению точности АНЗ (Гектин и др., 2008). При разработке установки необходимо устранить этот недостаток.

Заключение

Создание Государственного первичного специального эталона, предназначенного для обеспечения прецизионной радиометрической калибровки оптической аппаратуры наблюдения Земли, – существенный шаг в направлении реализации современной отечественной системы метрологического обеспечения разработки и эксплуатации радиометрической АНЗ. Представленные данные показывают, что по своим метрологическим и техническим характеристикам ГПСЭ не уступает лучшим зарубежным аналогам. Это является базой для создания российской АНЗ на уровне лучших современных образцов с радиометрической точностью, характеризуемой неопределенностью измерений $\leq 2\%$ в спектральном диапазоне 0,3-2,5 мкм и $\leq 0,2\text{ К}$ в спектральном диапазоне 3-15 мкм (приборы MODIS, MERIS и др.). Намечены дальнейшие наиболее актуальные шаги в рассмотренном направлении. Для обеспечения качества получаемых отечественных данных, соответствующего мировому уровню, проводится работа по включению создания технической и нормативной базы метрологического обеспечения разработки и эксплуатации АНЗ в Федеральную космическую программу Российской Федерации.

Литература

1. Гектин Ю.М., Романов А.В., Смелянский М.Б., Цветкова И.П. Решение теоретических и практических задач метрологического обеспечения многозонального сканирующего устройства МСУ-МР в ИК-диапазоне спектра // Труды Всероссийской конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва. 2008. С. 91 – 98.
2. ГОСТ 8.195-89 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,25 – 25,00 мкм; силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2 – 25,00 мкм. Москва. 1989.
3. Ковальский В.Я., Самойлов Л.Н. Связь погрешности косвенных и прямых измерений // Метрологическое обеспечение энергетической фотометрии некогерентного излучения. 1979. С. 48-78.
4. Кокс М., Харрис П. Основные положения Приложения 1 к Руководству по выражению неопределенности в измерении // Измерительная техника, 2005. № 4. С. 17-24.
5. Крутиков В.Н., Иванов В.С., Саприцкий В.И., Левтов В.Л., Маколкин Е.В., Кудашкина М.С., Архипов С.А. Система метрологического обеспечения радиометрической аппаратуры космического базирования для мониторинга Земли в интересах климатологии, экологии, предупреждения природных и техногенных катастроф // Тезисы доклада на Первой Всероссийской конференции «Роль стандартизации, метрологии, оценки соответствия в развитии производства инновационной и высокотехнологичной продукции в Российской Федерации». Жуковский. 2010.
6. Панфилов А.С. Метрологические аспекты измерений оптических характеристик системы «поверхность Земли-атмосфера» по результатам съемки из космоса // Исследование Земли из космоса, 2002. № 5. С. 15-21.
7. Панфилов А.С., Бурдакин А.А., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Лисянский Б.Е., Морозова С.П., Огарев С.А., Павлович М.Н., Самойлов М.Л., Хлевной Б.Б., Саприцкий В.И. Работы ВНИИОФИ в области метрологического обеспечения радиометрической калибровки и полетного контроля ста-

- бильности оптической аппаратуры наблюдения Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 288 – 294.
8. Панфилов А.С., Бурдакин А.А., Гектин Ю.М., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Лисянский Б.Е., Морозова С.П., Новикова Н.В., Огарев С.А., Павлович М.Н., Самойлов М.Л., Хлевной Б.Б., Саприцкий В.И. Привязка космических радиометрических данных оптического диапазона длин волн к международной системе единиц СИ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 282 – 287.
 9. МГ 43-2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». Минск. 2001.
 10. Guide to the Expression of Uncertainties in Measurements, first edition, 1993, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).

New Russian national standard facility for the Earth observation instruments radiometric calibration, estimation of the obtained radiometric data accuracy

**A.S. Panfilov¹, V.R. Gavrilov¹, V.S. Ivanov¹, V.N. Krutikov², B.E. Lisyansky¹,
S.P. Morozova¹, S.A. Ogarev¹, A.V. Puzanov¹, M.V. Solodilov¹,
B.B. Khlevnoy¹, V.I. Sapritsky¹**

*¹All-Russian Scientific and Research Institute for Optical and Physical Measurements
(VNIIOFI)*

119361 Moscow, 46 Ozernaya str,

E-mail: panfilov-m4@mail.ru;

²Federal Agency on Technical Regulation and Metrology

To provide the precision calibration of the Earth observation instruments the new state primary special standard facility (SPSSF) was constructed and built in VNIIOFI during 2006-2009 and approved for operation in 2010. The SPSSF consists of 2 different facilities destined for calibration within the spectral ranges 0.3-3 μm and 3-25 μm . The SPSSF main features and the hierarchy scheme for the radiometric quantities measuring tools are described. The increasing of the calibration accuracy due to the new SPSSF is shown. The new trends in developing of the metrological assurance for the Earth observation instruments are discussed.

Keywords: measurement standard, hierarchy scheme, Earth observation instruments, radiometric calibration, radiance, spectral responsivity, accuracy, uncertainty.