

Привязка космических радиометрических данных оптического диапазона длин волн к международной системе единиц СИ

А.С. Панфилов¹, А.А. Бурдакин¹, Ю.М. Гектин², В.С. Иванов¹, В.Н. Крутиков³,
Б.Е. Лисянский¹, С.П. Морозова¹, Н.В. Новикова², С.А. Огарев¹, М.Н. Павлович¹,
М.Л. Самойлов¹, Б.Б. Хлевной¹, В.И. Саприцкий¹

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

119361, Москва, ул. Озерная, 46

E-mail: panfilov-m4@mail.ru

² *Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения
(РНИИКП)*

³ *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии*

Определена необходимость прослеживаемости (привязки) космических радиометрических данных к национальным эталонам физических величин, выражаемых в единицах международной системы СИ. Описаны схемы привязки, действующие в России. Показана перспективность разработки специального эталонного радиометрического комплекса для прецизионной калибровки аппаратуры наблюдения Земли (АНЗ) и отражены некоторые проблемные вопросы этого проекта.

Ключевые слова: космические радиометрические данные, прослеживаемость, национальный эталон, калибровка, эталонный радиометрический комплекс.

Введение

В число стратегических задач, решаемых в соответствии с 10-летним Планом создания Глобальной системы наблюдения Земли GEOSS [1, 2], входит задача DA-06-02: «Разработать стратегию обеспечения качества данных GEOSS, начиная с наблюдений средствами космического базирования и оценкой расширения до контактных наблюдений, принимая во внимание существующие работы в этой области». Рабочая группа по калибровке и валидации (WGCV) Комитета по спутникам наблюдения Земли (CEOS) с 2006 г. ведет большую работу по ее решению. Детальное обсуждение этого вопроса проходило на 26 - 29 пленумах WGCV. В 2007 и 2008 г.г. проведены совещания GEO (Группа по наблюдениям Земли) /CEOS по разработке базового документа в области стратегии обеспечения качества данных GEOSS «Quality Assurance Framework for Earth Observation», который был одобрен 29 пленумом WGCV и принят 22 пленумом CEOS в 2008 г.

В соответствии с этим документом, одним из основных условий признания космических данных качественными является их прослеживаемость (traceability) к международно признанным эталонам физических величин, выражаемых в единицах международной системы СИ. При этом космические данные как результат измерений представляются в стандартных единицах и сопровождаются оценкой неопределенности измерений. Условию международного признания отвечает прослеживаемость данных к национальным эталонам стран, подписавших Договоренность о взаимном признании национальных эталонов, калибровочных и измерительных сертификатов под эгидой Международного комитета мер и весов [3]. Россия входит в число этих стран.

Привязка данных к российским национальным эталонам

Измеряемые величины

Измеряемой с помощью радиометрической АНЗ величиной, как правило, является эффективная энергетическая яркость (ЭЭЯ) $L = \int_0^{\infty} L(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda$, где λ - длина волны, $L(\lambda)$ - спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) наблюдаемого объекта или эталонного источника излучения при калибровке, $\bar{S}(\lambda)$ - относительная спектральная характеристика чувствительности АНЗ. В спектральном диапазоне отраженного солнечного излучения - (0,3 - 2,5) мкм, от ЭЭЯ переходят к СПЭЯ или «внеатмосферной» спектральной отражательной способности [4]. А в диапазоне, где преобладает собственное излучение наблюдаемых объектов - (3 - 25) мкм, - к эквивалентной температуре объекта, определяемой как температура черного тела, имеющего для данной АНЗ ту же ЭЭЯ, что и наблюдаемый объект. Таким образом, в качестве исходной физической величины выступает СПЭЯ.

Привязка в спектральном диапазоне (0,3 - 2,5) мкм

Привязка космических радиометрических данных этого диапазона к первичному эталону СПЭЯ в России определяется ГОСТом 8.195 - 89 [5]. Согласно ему, ниже представлен фрагмент государственной поверочной схемы, отражающий прослеживаемость данных к эталону. В соответствии с этой схемой ВНИИОФИ разработал серию идентичных установок для калибровки АНЗ в данном спектральном диапазоне [6 - 9]. В настоящее время в России из числа этих установок действует и проходит периодическую поверку метрологической службой только установка РНИИКП «Камелия». По результатам проведенных в 2007 - 2008 г.г. доработок и испытаний установка зарегистрирована в качестве рабочего эталона, как «Комплекс измерительный «Камелия», в Государственном реестре средств измерений под № 38477-08. В таблице 1 представлены его точностные параметры согласно выданному сертификату, которые укладываются в рамки, определяемые государственной поверочной схемой, с пределами допускаемых относительных погрешностей $\Delta_o = (2 - 10) 10^{-2}$.

Таблица 1. Точностные параметры комплекса

Пределы допускаемых доверительных границ суммарной относительной погрешности результата измерений абсолютного значения СПЭЯ диффузного осветителя на длине волны 0.98 мкм, %	± 9.0
Пределы допускаемых доверительных границ суммарной относительной погрешности результата измерений относительного распределения СПЭЯ диффузного осветителя, %	± 6.5
Пределы допускаемых доверительных границ суммарной относительной погрешности результата измерений относительного распределения излучения монохроматического осветителя, %	± 5.0

Из схемы также следует, что АНЗ в диапазоне (0,3 - 2,5) мкм может быть отнесена к рабочим средствам измерений с $\Delta_o = (8 - 15) 10^{-2}$.

Привязка в спектральном диапазоне (3 - 25) мкм

В этом диапазоне в отличие от предыдущего отсутствует действующая схема передачи размера единицы СПЭЯ от первичного эталона к АНЗ. Поэтому, как правило, для калибровки

используют полостные модели черного тела (МЧТ) с расчетной излучательной способностью близкой к 1 и прецизионным контактным измерением температуры стенок излучающей полости. При этом СПЭЯ выходной апертуры МЧТ определяется функцией Планка для измеренной температуры. В этом случае можно говорить о прослеживаемости к первичному эталону температуры [10]. В пределах температурного динамического диапазона АНЗ ~ (210 – 450) К достигнутая точность эталонных источников излучения характеризуется стандартной неопределенностью ($k = 1$) - (0,1 – 0,2) К [11]. В качестве примера такой МЧТ можно привести модели, разработанные ВНИИОФИ для японского космического агентства и ФГУП «Центр Келдыша» [12, 13].

Разработка специального эталонного радиометрического комплекса для прецизионной калибровки АНЗ

С 2006г. во ВНИИОФИ разрабатывается специальный эталонный радиометрический комплекс (СЭРК) для прецизионной калибровки АНЗ [13]. Постановка этой работы направлена на обеспечение:

- передового уровня точности калибровки АНЗ с привязкой получаемых с ее помощью данных к международной системе единиц СИ,
- калибровки перспективной АНЗ с крупногабаритной оптикой (с диаметром входных зрачков > 200 мм).

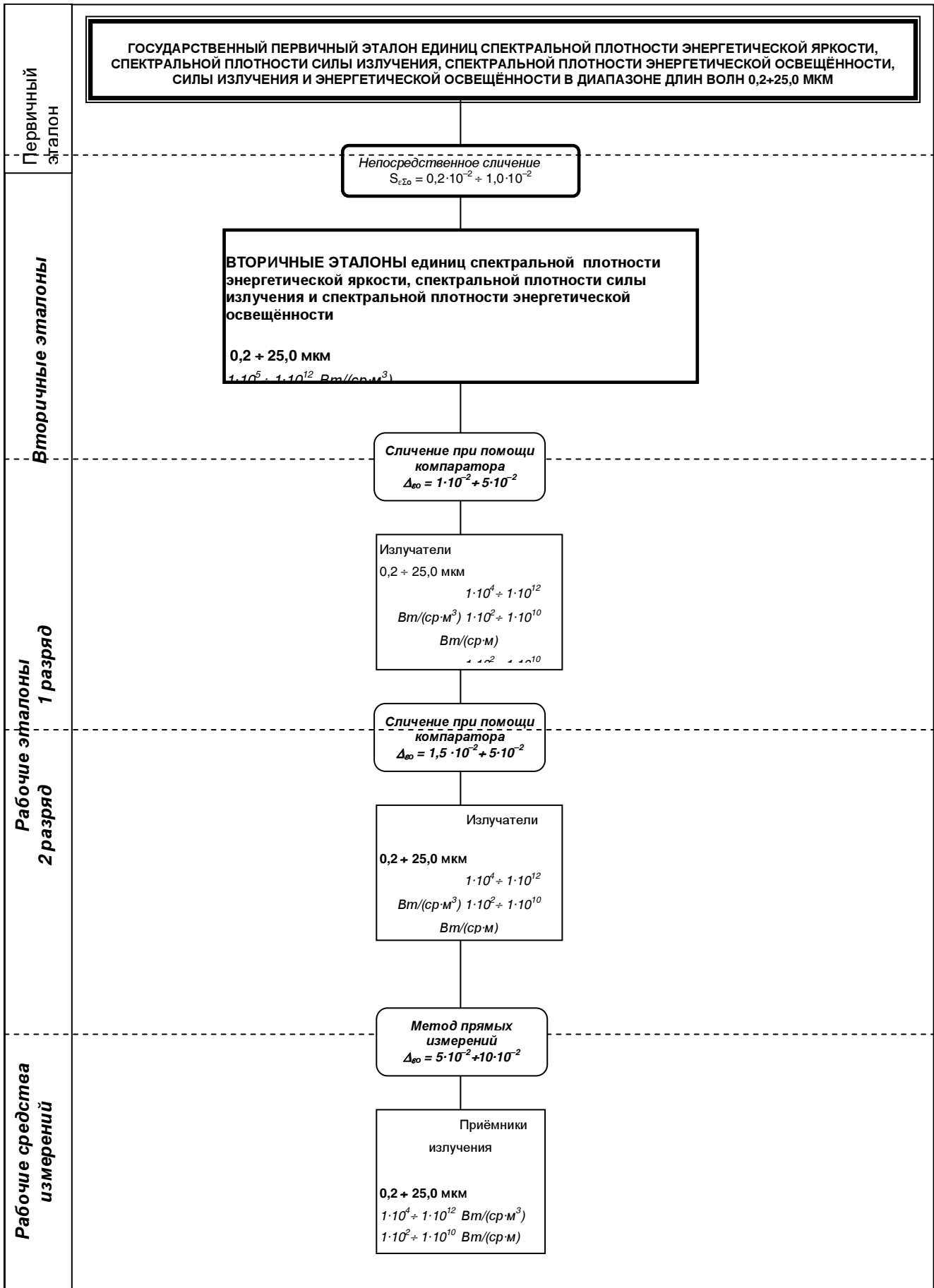
СЭРК будет состоять из двух установок, соответствующих рассмотренным спектральным диапазонам. Требования к их точностным и габаритным параметрам представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные требования к параметрам СЭРК

<i>Параметры</i>	<i>Значения</i>	
	<i>(0,3 – 3) мкм</i>	<i>(3 – 25) мкм</i>
Воспроизводимый диапазон СПЭЯ	0,06 – 530Вт/(м ² ср мкм)	
Стандартная неопределенность воспроизведения СПЭЯ	(0,5 – 1,5) %	
Воспроизводимый диапазон радиационных температур		(210 – 450) К
Стандартная неопределенность воспроизведения радиационных температур		(0,1 – 0,3) К
Размеры выходных зрачков эталонных излучателей	600 мм	500 мм

Принципы передачи и воспроизведения размера единицы СПЭЯ, заложенные в СЭРК, аналогичны описанным в предыдущем разделе. Передача размера единицы измеряемой величины к АНЗ будет осуществляться с помощью входящих в состав установок широкоапертурных эталонных излучателей: крупногабаритной интегрирующей сферы и низкотемпературной широкоапертурной МЧТ. Размер единицы СПЭЯ передается к широкоапертурной интегрирующей сфере как и в схеме ГОСТ 8.195 – 89 [14] от высокотемпературной МЧТ, но, в отличие от нее, минуя промежуточные звенья. За счет этого достигается выигрыш в точности.

В диапазоне (3 – 25) мкм обеспечивается описанная выше прослеживаемость к первичному эталону температуры. Но, так как используется неполостная МЧТ, то для определения СПЭЯ ее выходной апертуры необходимо решение проблемы точного знания спектральной излучательной способности МЧТ. Как отмечалось в [13], в этом диапазоне необходима имитация при калибровке реальной фоновой обстановки, которая достигается размещением калибровочного оборудования в крио-вакуумной камере.



Фрагмент государственной поверочной схемы ГОСТ 8.195 – 89

Заключение

Для обеспечения качества радиометрических данных АНЗ необходима их привязка к первичным эталонам измеряемых физических величин и высокий уровень средств калибровки, с помощью которых она осуществляется. Имеющиеся в России средства не отвечают современным требованиям по точности и обеспечению калибровки перспективной АНЗ с крупногабаритной оптикой. На преодоление этих трудностей направлена разработка специального эталонного радиометрического комплекса для прецизионной калибровки АНЗ. В процессе реализации проекта необходимо решение проблемных вопросов в тепловом инфракрасном диапазоне длин волн, связанных с точным определением спектральной излучательной способности МЧТ и имитацией реальных условий функционирования АНЗ при передаче ей размера единицы СПЭЯ.

Литература

1. Global Earth Observation System of Systems GEOSS. 10-Year Implementation Plan. GEO 1000. 2005. 27 p.
2. *Панфилов А.С., Саприцкий В.И.* Глобальная система систем наблюдения Земли и обеспечение единства измерений при ее реализации // Измерительная техника, 2005. № 4. С. 71-72.
3. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Technical report. Bureau Intern. Poids Mesures. Sevres. 1999.
4. *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.
5. 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.
6. Космическая система “Ресурс” для исследования природных ресурсов Земли и контроля окружающей среды. Оперативная подсистема “Ресурс-О” для наблюдения суши. Справочное пособие / Под ред. Л.И. Гусева и др. М.: Главкосмос, 1988. 234 с.
7. *Киселев И.А., Коростелев А.Н., Нараева М.К. Панфилов А.С., Романов А.В.* Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ "Ресурс-01" // Исследование Земли из космоса, 1991. № 2. С. 34-43.
8. *Богданов А.А., Стожкова В.Н., Севастьянова О.И., Толстых Г.Н.* О результатах метрологической аттестации измерительного поверочного комплекса "Крона-С" диапазона спектра 0,35-2,20 мкм // Труды ГосНИЦИПР. 1988. Вып. 32. С. 141-150.
9. *Тыннисон Т.А., Граф Р.Э., Мартин Л.О.* Поверочная установка "Спектр" для метрологической аттестации аэрокосмической радиометрической аппаратуры в диапазоне длин волн 0,3-2,5 мкм // В сб.: Дистанционное зондирование атмосферы с борта орбитального комплекса "Салют-7" - "Космос-1686" - "Союз-Т14". Тарту: 1989. С. 54-66.
10. ГОСТ 8.558-93 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.
11. *Mangum B.W., Furukawa G.T., Kreider K.G., Meyer C.W., Ripple D.C., Strouse G.F., Tew W.L., Moldover M.R., Johnson B. Carol, Yoon H.W., Gibson C.E., Saunders R.D.* The Kelvin and Temperature Measurements // J. Res. National Institute Standards and Technology. 2001. V. 106. № 1. P. 105 – 149.
12. *Ogarev S.A., Samoylov M.L., Parfentyev N.A., Sapritsky V.I.* Low-Temperature Blackbodies for IR Calibrations in a Medium-Background Environment // Int. J. Thermophys. 2008. DOI 10.1007/s10765-008-0490-1.

13. 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 стабильности оптической аппаратуры наблюдения Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. С. 288–294.

14. Саприцкий В.И., Мехонцев С.Н., Павлович М.Н., Власов Л.В., Самойлов Л.Н., Сударев К.А., Харченко Г.Д., Хлевной Б.Б. Воспроизведение радиометрических единиц // Вопросы радиометрии в оптической области спектра. Сборник научных трудов. – М.: ВНИИФТРИ. 1990. С. 6–10.

SI traceability for space radiometric measurements within optical waveband

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

²*Russian Institute of Space Device Engineering
(RNIKP)*

³*Federal Agency on Technical Regulation and Metrology*

The need for SI traceability of space radiometric measurements to national physical standards is shown. Some designs of traceability applicable in Russia are described. It is shown that reference radiometric system specially designed for precise calibration of the instruments for Earth observation should be developed. Some problematical aspects of this project are touched upon.

Keywords: space radiometric data, traceability, national standard, calibration, reference radiometric system.