

# Работы ВНИИОФИ в области метрологического обеспечения радиометрической калибровки и полетного контроля стабильности оптической аппаратуры наблюдения Земли

А.С. Панфилов<sup>1</sup>, А.А. Бурдакин<sup>1</sup>, В.С. Иванов<sup>1</sup>, В.Н. Крутиков<sup>2</sup>, Б.Е. Лисянский<sup>1</sup>,  
С.П. Морозова<sup>1</sup>, С.А. Огарев<sup>1</sup>, М.Н. Павлович<sup>1</sup>, М.Л. Самойлов<sup>1</sup>, Б.Б. Хлевной<sup>1</sup>,  
В.И. Саприцкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений  
(ВНИИОФИ)*

*119361, Москва, ул. Озерная, 46*

*E-mail: [panfilov-m4@mail.ru](mailto:panfilov-m4@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии*

Представлены основные направления работ ВНИИОФИ в области метрологического обеспечения разработки и эксплуатации спутниковой аппаратуры наблюдения Земли в оптическом диапазоне длин волн. Они включают создание эталонной базы для наземной калибровки и полетного контроля стабильности аппаратуры, периодическую поверку средств измерений организаций-разработчиков аппаратуры, участие в международном проекте создания Глобальной системы наблюдения Земли GEOSS в части разработки стратегии обеспечения качества данных GEOSS.

## Введение

ВНИИОФИ с семидесятых годов 20 века проводит работы по метрологическому обеспечению разработок систем съемки планет с борта автоматических межпланетных станций и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса [1-6]. Были созданы установки для калибровки радиометрической аппаратуры «Терек», «Поиск», «Камелия», «Крона», «Спектр». К сожалению кризис девяностых годов отразился и на состоянии метрологического обеспечения космического приборостроения в России. Оно было охарактеризовано следующим образом на проведенных по инициативе Ростехрегулирования в 2005 и 2007 г.г. межведомственных совещаниях (Ростехрегулирование, Роскосмос, РАН и другие организации) по вопросам радиометрической калибровки спутниковой аппаратуры наблюдения Земли (САНЗ):

- имеющаяся в России стендовая база калибровки САНЗ в спектральном диапазоне отраженного солнечного излучения не удовлетворяет современным требованиям по точности, ширине охватываемого спектрального диапазона и размерам излучающей поверхности эталонных источников излучения;
- в России нет современных криогенно-вакуумных установок для калибровки аппаратуры теплового ИК диапазона;
- в настоящее время в России отсутствует единая нормативно-методическая база радиометрической калибровки САНЗ.

Начавшееся в соответствии с Федеральной космической программой Российской Федерации воссоздание космической группировки спутников ДЗЗ стимулировало постановку работ во ВНИИОФИ, направленных на создание единой системы метрологического обеспечения разработки и эксплуатации САНЗ оптического диапазона.

Эта система должна обеспечивать наземную калибровку аппаратуры и контроль ее стабильности в процессе функционирования на орбите, для чего необходимо иметь соответствующую техническую базу и нормативно-методическую документацию. Согласно этому ниже рассматриваются вопросы:

- создания во ВНИИОФИ специального эталонного радиометрического комплекса для обеспечения прецизионной калибровки САНЗ;

- метрологического обеспечения калибровочного оборудования организаций-разработчиков САНЗ;
- создания сверхвысокостабильных бортовых излучателей теплового ИК диапазона;
- разработки нормативно-методической документации.

### Создание специального эталонного радиометрического комплекса

В целях обеспечения прецизионной калибровки САНЗ ВНИИОФИ с 2006 г. проводит разработку специального эталонного радиометрического комплекса (СЭРК) для калибровки оптико-электронной аппаратуры в диапазоне длин волн (0,3 – 25) мкм. СЭРК будет состоять из двух установок, работающих в диапазонах (0,3 – 3) мкм и (3 – 25) мкм.

На начальном этапе ключевым вопросом было определение наиболее высоких требований к точности абсолютных радиометрических измерений с помощью САНЗ, на которые должна быть ориентирована разработка. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 1. В ней на основе [7] и данных Всемирной метеорологической организации (WMO Satellite Data Requirements <http://ioc.unesco.org/>) даны требования к точности измерений геофизических параметров, которые могут быть получены с помощью САНЗ. Эквивалентные им требования к радиометрической точности спутниковой аппаратуры представлены в соответствии с [7] за исключением нормированного дифференциального вегетационного индекса (NDVI). Требование WMO к точности определения NDVI оказалось выше, чем в [7], и определило самое высокое значение требуемой точности спутниковой аппаратуры в коротковолновой области. Получение его дано в Приложении.

Таблица 1. Требования к точности и долговременной стабильности САНЗ

Параметр	Требуемая точность	Требуемая радиометрическая точность	Требуемая радиометрическая стабильность (за десятилетие)
Высота нижней границы облачности	0.5 km	1 К	0.2 К
Высота верхней границы облачности	0.15 km	1 К	0.2 К
Давление на верхней границе облачности	15 hPa	1 К	0,2 К
Температура на верхней границе облачности	0.5 К	0.5 К	0.2 К
Оптическая толщина облачности	10 %	5 %	1 %
Тепловое излучение в узких спектральных зонах	0.1 К	<b>0.1 К</b>	0.04 К
Температурный профиль атмосферы	0.5 К	0.5 К	0.04 К
Профиль влажности атмосферы	5 %	1 К	0.03 К
Озонный профиль	3 %	1 %	<b>0.1 %</b>
Альбедо поверхности	0.01	5 %	1 %
Нормированный дифференциальный вегетационный индекс	3 %[7] 1 %[WMO]	2 %[7] <b>≤ 0.5 %</b>	0.8 %
Температура земной поверхности	0.3 К	0,3 К	-
Температура поверхности океана	0.1 К	<b>0.1 К</b>	<b>0.01 К</b>

В столбцах 3 и 4 таблицы 1 требования, выраженные в %, относятся к измерению яркости в диапазоне (0.3 - 3.0) мкм, а в К – к измерению радиационной температуры в диапазоне (3 – 25) мкм. Предельные значения выделены полужирным шрифтом. С их использованием были сформированы основные требования к параметрам СЭРК, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Основные требования к параметрам СЭРК

Параметры	Значения	
	(0,3 – 3) мкм	(3 – 25) мкм
Воспроизводимый диапазон СПЭЯ	0,06 – 530Вт/(м <sup>2</sup> 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

На рис. 1 в самом общем виде показаны схемы радиометрической калибровки САНЗ с использованием упоминавшихся установок СЭРК. В диапазоне (0.3 - 3.0) мкм с помощью двух широкоапертурных эталонных источников излучения измеряются спектральные и градуировочные характеристики САНЗ. В диапазоне (3.0 - 25) мкм с использованием широкоапертурной модели черного тела (МЧТ) измеряются градуировочные характеристики САНЗ в тепловом ИК диапазоне. В этом диапазоне для получения достоверных результатов необходима имитация при калибровке реальной фоновой обстановки, которая достигается размещением калибровочного оборудования в крио-вакуумной камере. Для сокращения затрат на создание и эксплуатацию такой камеры в [8] предлагалась идея объединенного метрологического центра коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ на базе существующего стенда тепловакуумных испытаний ФГУП «Центр Келдыша». МЧТ на фазовом переходе галлия (Ga) рядом с крио-вакуумной камерой - эталонный излучатель. Размер единицы радиометрической величины от него передается широкоапертурной МЧТ.

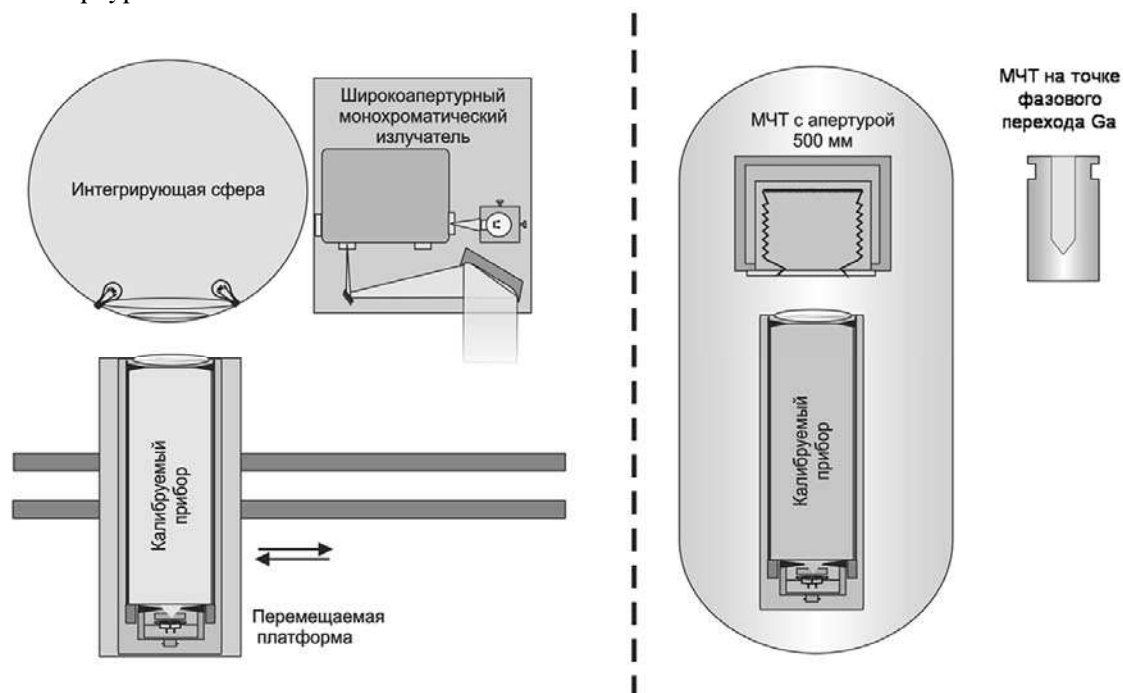


Рис. 1. Схемы радиометрической калибровки САНЗ. А - в диапазоне (0,3-3) мкм, Б - в диапазоне (3-25) мкм в крио-вакуумной камере

### Метрологическое обеспечение организаций-разработчиков САНЗ

ВНИИОФИ как ведущий российский метрологический центр в области оптических измерений осуществляет разработку и поставку рабочих эталонов для организаций-разработчиков

САНЗ, а также периодическую поверку их средств измерений. В число последних входят приемники излучения, светоизмерительные лампы и калибровочные установки.

В последние годы ВНИИОФИ разработал и поставил модели черного тела МЧТ100 для ФГУП «Центр Келдыша» и ВВ-80/350 для ФГУП «РНИИ КП». Их параметры даны соответственно в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Параметры МЧТ100

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, мкм	1,5 - 15
Излучательная способность	0,997 ±0,001
СКО поддержания температуры, К	± 0.02 К
Неравномерность температуры по излучающей поверхности, К Температурный диапазон, К	0,04 240 - 350
Апертура, мм	100

Таблица 4. Параметры МЧТ ВВ-80/350

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, мкм	2,5 - 15
Излучательная способность	0,96 ±0,02
Погрешность воспроизведения радиационной температуры на уровне 300 К при доверительной вероятности 0,95, К	0,5
Нестабильность температуры, К	0,1
Неравномерность температуры по излучающей поверхности, К	±0,1
Температурный диапазон, К	220 - 350
Апертура, мм	350

Из числа указанных выше установок для калибровки радиометрической аппаратуры в России действует и проходит периодическую поверку метрологической службой только установка РНИИ КП «Камелия». В настоящее время с помощью ВНИИОФИ проводятся работы по ее модернизации.

### Создание сверхвысокостабильных бортовых излучателей теплового ИК диапазона

Влияние воздействий в процессе вывода спутника на орбиту, а также факторов космического полета приводят к необходимости контроля постоянства характеристик САНЗ на протяжении всего времени ее активного функционирования (до 10 лет). Наиболее высокие требования к долговременной стабильности чувствительности аппаратуры предъявляет задача регистрации малых изменений климатических переменных в процессе мониторинга глобальных климатических изменений. Они отражены в таблице 1, согласно [7], и составляют 0,1 % и 0,01 К за десятилетие для спектральных диапазонов (0.3 - 3.0) мкм и (3 - 25) мкм соответственно.

Успехи в исследованиях Луны как тестового объекта в диапазоне 0,35 – 2,5 мкм [9] позволяют обеспечить контроль стабильности в первом диапазоне на необходимом уровне. В тепловом ИК диапазоне долговременная стабильность в условиях космического полета моделей ЧТ, используемых в качестве бортовых опорных излучателей, неизвестна. Их температура измеряется с помощью термодатчиков, поверка которых невозможна, а постоянство излучательной способности не контролируется. Контроль стабильности аппаратуры на заданном уровне по наземным тестовым участкам нереален из-за проблем столь точного учета параметров атмосферы и излучательной способности наблюдаемых объектов.

ВНИИОФИ совместно с SDL (США) на 26 пленарном заседании Рабочей группы по калибровке и валидации CEOS (WGCV 26 - Таиланд, 2006г.) в качестве решения задачи предложили создание и использование для рассматриваемых целей бортовых реперных МЧТ на основе фазового перехода чистых металлов и эвтектических сплавов в температурном диапазоне (280 – 310)

К. Во ВНИИОФИ были проведены лабораторные исследования фазовых переходов выбранных материалов – Ga и биметаллических эвтектических сплавов Ga, в ячейках малого размера (масса рабочего вещества ~ 100 г). Некоторые экспериментальные результаты представлены в таблице 5. Подробное описание экспериментов и полученных результатов дано в статье [10].

Таблица 5. Экспериментальные данные параметров фазовых переходов

Рабочее вещество	Температура плавления, К	Повторяемость ( $\sigma$ ) в пределах отдельных серий измерений, тК	Повторяемость ( $\sigma$ ) в целом, тК
Ga	302.757	0.5 - 1	2.6
GaIn	288.655	1 - 2	3.0
GaSn	293.482	0.8 - 1	2.7

Представленные данные по повторяемости температуры плавления свидетельствуют о перспективности использования этих материалов в дальнейших исследованиях. Окончательный выбор рабочих материалов, размеров ячеек, определение оптимальных параметров реализации фазовых переходов можно будет сделать по результатам проведения аналогичных экспериментов в космосе. Решением Координационного научно-технического совета Роскосмоса они включены в «Долгосрочную программу научно-прикладных экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС».

### Международное сотрудничество

ВНИИОФИ с 2004 г. участвует в подготовке и реализации 10-летнего Плана создания Глобальной системы наблюдения Земли GEOSS под руководством международной Группы по наблюдениям за Землей (GEO) [11, 12].

Работа, представленная в предыдущем разделе, является составной частью решения задачи DA-06-02 по разработке стратегии обеспечения качества данных GEOSS, поставленной в 2006 г. и запланированной на 2007 – 2009 г.г. Она направлена на обеспечение совместимости данных. Другое направление участия ВНИИОФИ в решении этой задачи – это подготовка международных стандартов по процессам калибровки САНЗ и качеству данных, которая активно проводится под руководством GEO и CEOS (Комитета по спутникам наблюдения Земли). Его актуальность связана с необходимостью разработки в России единой нормативно-методической базы радиометрической калибровки САНЗ, которая должна быть гармонизирована с международными стандартами.

В заключение следует отметить, что рассмотренные работы ВНИИОФИ направлены на создание в России современной системы обеспечения качества данных наблюдения Земли, с помощью которой российские данные смогут выйти на уровень международных требований к ним.

Приложение

### Требования к точности радиометрических измерений при определении NDVI

NDVI определяется следующим образом:

$$NDVI = \frac{a_{NIR} - a_{red}}{a_{NIR} + a_{red}}, \quad (1)$$

где  $a_{NIR}$  и  $a_{red}$  – соответственно отражательная способность наблюдаемого объекта в ближней ИК и красной областях спектра длин волн.

Зависимость значения неопределенности NDVI –  $u_a(NDVI)$ , от значений неопределенностей измерений отражательной способности в указанных зонах  $u(a_{NIR})$  и

$u(a_{red})$  можно получить, используя «закон распространения неопределенности» для результата измерения  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  [13, 14]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j), \quad (2)$$

где  $u_c(y)$  – суммарная стандартная неопределенность результата измерения  $y$ ,

$u(x_i)$  – стандартные неопределенности входных оценок  $x_i$ ,

$r(x_i, x_j)$  – оцененный коэффициент корреляции.

Применяя (2) для функции (1) и пренебрегая в первом приближении корреляцией между спектральными зонами, получим:

$$u_a(NDVI) = \sqrt{\left(\frac{\partial NDVI}{\partial a_{NIR}}\right)^2 u^2(a_{NIR}) + \left(\frac{\partial NDVI}{\partial a_{red}}\right)^2 u^2(a_{red})}, \quad (3)$$

где коэффициенты влияния [13]:

$$\frac{\partial NDVI}{\partial a_{NIR}} = \frac{2a_{red}}{(a_{NIR} + a_{red})^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial NDVI}{\partial a_{red}} = \frac{-2a_{NIR}}{(a_{NIR} + a_{red})^2}. \quad (5)$$

В предположении  $u(a_{NIR}) = u(a_{red}) = u(a)$  и используя (3 – 5), получим следующее выражение для  $u(a)$ , необходимой для обеспечения требуемой точности измерения NDVI, характеризуемой неопределенностью  $u_a(NDVI)$ :

$$u(a) = u_a(NDVI) \sqrt{\frac{2\sqrt{a_{NIR}^2 + a_{red}^2}}{(a_{NIR} + a_{red})^2}}. \quad (6)$$

Согласно этому выражению для области больших значений NDVI = 0.6 – 0.8 удовлетворение требования WMO к точности его определения 1 % возможно при обеспечении точности радиометрических измерений (0.36 – 0.5) %. При более низких NDVI требования будут еще выше. Однако, учитывая другие составляющие неопределенности NDVI – из-за влияния атмосферы, геометрии наблюдения, наличия облачности [15], реализация их нецелесообразна. Поэтому за базовое принимается значение 0.5 %.

## Литература

1. Киселев И.А., Нараева М.К., Панфилов А.С., Романов А.В. Энергетическая калибровка спектральных сканирующих устройств для планетных исследований. // Труды IV международного семинара «Научное космическое приборостроение». М. ИКИ АН СССР. 1990. С. 158 – 163.
2. Космическая система “Ресурс” для исследования природных ресурсов Земли и контроля окружающей среды. Оперативная подсистема “Ресурс-О” для наблюдения суши // Справочное пособие под ред. Гусева Л.И. и др. М.: Главкосмос. 1988. 234 с.
3. Киселев И.А., Коростелев А.Н., Нараева М.К., Панфилов А.С., Романов А.В. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ “Ресурс-О1” // Исследование Земли из космоса, 1991. № 2. С. 34-43.
4. Аванесов Г.А., Богданов А.А., Наумов А.П. и др. Методика и аппаратура радиометрической градуировки в абсолютных энергетических единицах многозональной сканирующей системы «Фрагмент» // Исследование Земли из космоса, 1981. № 6. С.79-88.
5. 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.

6. *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.
7. *Ohring G., Wielicki B., Spencer R., Emery B., and Datla R. (eds).* Satellite Instrument Calibration for Measuring Global Climate Change. NIST Publication NISTIR 7047. 2004. 108 p.
8. *Беднов С.М., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Мацуцкий Ю.П., Огарев С.А., Панфилов А.С., Самойлов М.Л., Саприцкий В.И., Хлевной Б.Б.* Вопросы создания объединенного метрологического центра коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ // Труды третьей открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. 2005. Т. 1. С. 163 – 170.
9. *Kieffer H.H., Stone T.C.* The Spectral Irradiance of the Moon // *The Astronomical Journal*. 2005. V. 129. P. 2887-2901.
10. *Burdakin A., Khlevnoy B., Samoylov M., Sapritsky V., Ogarev S., Panfilov A., Bingham G., Privalsky V., Tansock J., Humpherys T.* Melting points of gallium and of binary eutectics with gallium realized in small cells. // *Metrologia*. 2008. V. 45. P. 75 – 82.
11. Global Earth Observation System of Systems GEOSS. 10-Year Implementation Plan. GEO 1000. 2005. 27 p.
12. *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.
13. Guide to the Expression of Uncertainties in Measurements, first edition, 1993, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).
14. *Miura T., Huete A.R., Yoshioka.* Evaluation of Sensor Calibration Uncertainties on Vegetation Indices for MODIS // *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*. 2000. V. 38. № 3. P. 1399-1409.
15. *Goward S.N., Markham B., Dye D.G., Dulaney W., Yang J.* Normalized Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. // *Remote Sens. Environ.* 1991. V. 35. P. 257–277.