
**КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ,
СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК**

**СИСТЕМА ВАЛИДАЦИОННЫХ ПОДСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЛИБРОВКИ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ
И ВАЛИДАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ**

© 2025 г. Ю. В. Киселева¹, *

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”», Москва, Россия*

**E-mail: julia.v.kiseleva@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.08.2024 г.

Приводится описание системы валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН ГМ), созданной в период 2012–2016 годов ФГБУ «НИЦ “Планета”» совместно с научными институтами Росгидромета, Российской академии наук и учреждениями Госкорпорации “Роскосмос” для контроля бортовой калибровки, проведения внешней калибровки (включая интеркалибровку) бортовой целевой аппаратуры отечественных космических комплексов гидрометеорологического назначения и валидации спутниковых информационных продуктов. СВПН ГМ разработана с учетом международных обязательств Росгидромета как участника международного обмена спутниковыми данными в рамках ВМО и члена созданной в рамках ВМО рабочей группы GSICS (Глобальная космическая система по интеркалибровке).

Ключевые слова: интеркалибровка, валидация, спутник, МСУ-МР, ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ, МСУ-ГС, СО₂

DOI: 10.7868/S3034540525030077

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существенно возросла роль спутниковых данных при подготовке численных прогнозов погоды (ЧПП), реанализов, проведении экологического мониторинга и моделировании изменений климата. Например, в (Saunders, 2021) рассмотрены результаты усвоения разных типов спутниковых данных (измерений и информационных продуктов) при подготовке ЧПП в Метеослужбе Великобритании, которые показывают, насколько существенен вклад измерений микроволновых радиометров и инфракрасных зондировщиков в повышение точности прогнозирования. обстоятельный обзор исследований по данной тематике приведен также в (Eyre et al., 2021). Аналогичные работы по усвоению данных измерений российских метеоспутников выполнены в Гидрометцентре России (Цырульников и др., 2019; Цырульников и др., 2021).

Для эффективного применения спутниковых данных и информационной продукции в различных приложениях необходимо контролировать работоспособность спутниковой целевой аппаратуры (ЦА), достоверность и стабильность получаемых данных измерений в течение всего срока

активного существования (во время летных испытаний и эксплуатации на орбите), приводить изменения различных приборов, отличающихся своими характеристиками, к единой энергетической шкале в системе СИ и, тем самым, обеспечивать однородность однотипных измерений ЦА различных космических аппаратов (КА). Обязательным является также контроль качества получаемых спутниковых информационных продуктов.

При запуске и дальнейшей эксплуатации очередного КА на результаты измерений ЦА и, тем самым, качество информационных продуктов могут влиять различные факторы. Выявить эти факторы на Земле и компенсировать их влияние, например, средствами бортовой радиометрической калибровки часто не представляется возможным. В связи с этим необходимо проведение интеркалибровки, то есть проверки непосредственно на орбите по референсному спутниковому прибору или, альтернативно, внешней калибровки по независимому эталону (например, результатам высокоточного моделирования). В качестве референсной ЦА выбирается та, стабильность радиометрических характеристик которой сохраняется при длительной эксплуатации и постоянно проверяется на точность и достоверность.

ГЛОБАЛЬНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПО ИНТЕРКАЛИБРОВКЕ

В 2005 году по инициативе Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Координационной группы по метеорологическим спутникам (CGMS – Coordination Group for Meteorological Satellites) была сформирована международная рабочая группа, имеющая целью создание системы мониторинга и контроля качества измерений метеорологических КА и спутников наблюдения Земли, которая получила название Глобальная космическая система по интеркалибровке – Global Space-based Inter Calibration System (GSICS), см. интернет ресурс <https://gsics.wmo.int/>.

Основной целью деятельности GSICS является обеспечение постоянной точности спутниковых данных для мониторинга изменений климата, прогнозирования погоды и экологических приложений путем контроля характеристик ЦА, оперативной интеркалибровки приборов, привязки спутниковых измерений к единым шкалам и системе СИ (абсолютным эталонам и стандартам), а также повторной калибровки архивных измерений. В рамках GSICS разрабатываются общие методологии и внедряются рабочие процедуры для обеспечения качества и сопоставимости спутниковых измерений, выполненных в разное время и в разных местах различными приборами в составе КА, эксплуатируемых различными спутниковыми агентствами и входящих в Интегрированную глобальную систему наблюдений ВМО (ИГСН ВМО). Основное внимание уделяется внешней калибровке (в т.ч. интеркалибровке) ЦА космических аппаратов на приполярных и геостационарных орбитах (Fangfang Yu. et al., 2009; Murata H., 2017; Rublev A.N., 2018).

Членами GSICS являются в настоящее время космические агентства и Метеорологические Службы Евросоюза, Индии, Китая, России (Госкорпорация “Роскосмос”, Росгидромет), США, Франции, Южной Кореи, Японии, см. (<https://gsics.wmo.int/en>).

GSICS состоит из нескольких групп и подразделений. Исполнительная группа, состоящая из представителей участвующих агентств, устанавливает стратегические приоритеты, а также контролирует и оценивает развитие и деятельность GSICS. Исследовательские и рабочие группы консультируют Исполнительную группу и помогают в планировании и реализации исследований GSICS и деятельности по управлению данными. Специальные рабочие группы, созданные в каждом спутниковом агентстве, отвечают за взаимную калибровку бортовой целевой аппаратуры своего агентства с аппаратурой других спутников. Также в GSICS входят функционально несколько центров обработки дан-

ных, национальные лаборатории по стандартизации, крупные центры численного прогноза погоды и др., а также сегменты поддержки калибровки, такие как полевые площадки и лаборатории. Специальный координационный центр, созданный на базе Национальной службы спутниковых данных и информации об окружающей среде (NESDIS) NOAA (США), согласовывает и отслеживает действия групп исследователей и центров обработки данных, поддерживает Интернет-центр обмена информацией и данными между членами GSICS и потребителями данных, а также отвечает за публикацию ежеквартального информационного бюллетеня GSICS (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/GCC/newsletters.php>).

По рекомендациям GSICS космическими агентствами и/или Метеослужбами создаются сайты по мониторингу калибровок и результатам взаимных калибровок целевой аппаратуры метеорологических КА и спутников наблюдения Земли, содержащие соответствующую информацию в численном формате и в графическом виде, см., например:

– https://www.star.nesdis.noaa.gov/GOESCal/G16_ABI_IR_InterCal_static.php (интеркалибровка радиометров ABI, устанавливаемых на американских КА серии GOES);

– <https://gsics.eumetsat.int/thredds/catalog/himawari9-ahi-metopb-iasi-demo-nrtc/catalog.html> (интеркалибровка радиометров АНІ, устанавливаемых на японских КА серии Himawari);

– <http://gsics.tools.eumetsat.int/plotter/> (интеркалибровка радиометров SEVIRI, устанавливаемых на европейских КА серии Meteosat).

СИСТЕМА ВАЛИДАЦИОННЫХ ПОДСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СВПН ГМ

В рамках Федеральной космической программы 2006–2015 и в соответствии с рекомендациями GSICS в «НИЦ “Планета”» совместно с институтами Российской академии наук, учреждениями Росгидромета и организациями Госкорпорации “Роскосмос” создана и в настоящее время функционирует отечественная система внешней калибровки бортовой целевой аппаратуры КА гидрометеорологического и океанографического назначения (серий “Метеор-М”, “Электро-Л”, “Арктика-М”) и валидации информационных продуктов, получившая название СВПН ГМ. Система состоит из нескольких крупных аппаратно-программных комплексов, включающих в себя программно-математический аппарат для проведения процедур внешней калибровки и валидации, архив спутниковых и наземных данных на тестовых полигонах.

На рис. 1 представлены состав необходимой информации и функциональная схема ее использования в СВПН ГМ.

В качестве референсных или эталонных данных используются измерения аналогичной зарубежной аппаратуры, которая участвует в международных калибровочных кампаниях, а также данные наземной наблюдательной сети Росгидромета и измерения на специально созданных тестовых полигонах. В таблице 1 представлены российская поверяемая аппаратура и аналогичные зарубежные эталонные приборы/эталонные данные, используемые при проведении интеркалибровки/внешней калибровки.

Для валидации спутниковых информационных продуктов проводится ряд измерений на тестовых полигонах. Например, в Центральной Сибири используется экспериментальная площадка Средне-Енисейского стационара Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Стационар расположен в 25 км западнее р. Енисей вблизи поселка Зотино Туруханского района Красноярского края, на крайнем востоке Западно-Сибирской равнины, в зоне тайги с географическими координатами: 60°26' с.ш., 89°24' в.д. На территории размещается научная обсерватория ZOTTO (The Zotino Tall

Tower Observation Facility), основу которой составляет металлическая мачта высотой 300 м (Тимохина и др., 2015). С использованием аппаратуры, установленной на этой мачте, на площадке проводятся постоянные измерения в приземном слое атмосферы (0–300 м) вертикальных профилей температуры, концентраций водяного пара, оксида углерода и парниковых газов, измерения параметров аэрозоля (включая дым от лесных пожаров). Дополнительно сотрудники Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН проводят здесь спектроскопические измерения общего содержания метана и угарного газа при наличии прямой видимости Солнца, а озона – по рассеянному из зенита солнечному излучению (Моисеенко и др., 2019). Такие же спектроскопические измерения общего содержания различных атмосферных газов проводятся на полигоне “Петергоф” сотрудниками кафедры физики атмосферы СПбГУ; там же измеряются вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере, водность облаков (Рублев и др., 2024). Для валидации границ ледового покрова, получаемым по спутниковым данным, на полигоне “Полярный” проводят измерения параметров снежно-ледяного покрова и припая на прибрежных и островных полярных станциях в морях бассейна Северного Ледовитого океана.

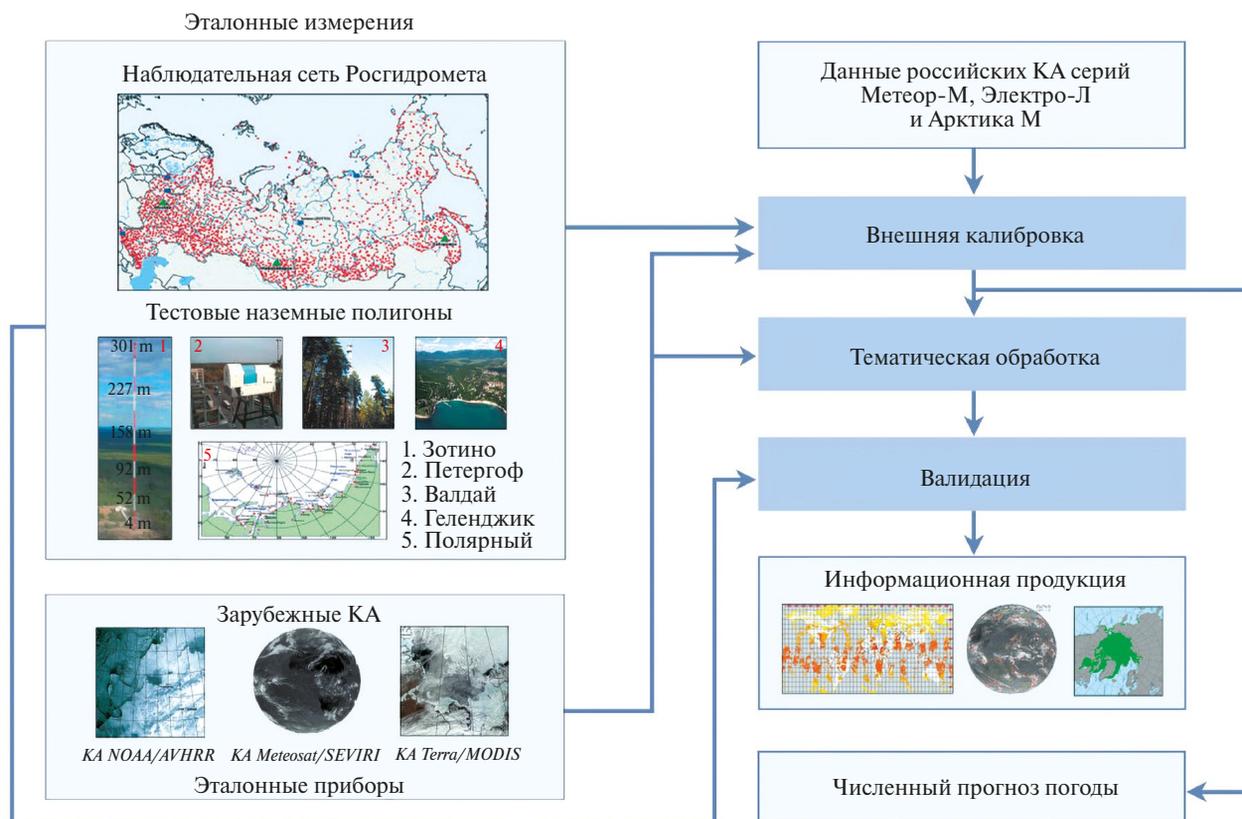


Рис. 1. Структура и функциональная схема СВПН ГМ.

Таблица 1. Российская и зарубежная бортовая целевая аппаратура для проведения работ по внешней калибровке

Космический аппарат (КА)	Бортовая целевая аппаратура	Референсные измерения
Полярно-орбитальные КА серии “Метеор-М”	Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР	AVHRR/MetOp-A SEVIRI/Meteosat-11
	Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2	SEVIRI/ Meteosat-11
	Микроволновой радиометр с функциями сканера и атмосферного зондировщика МТВЗА-ГЯ – модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы	Модельные (расчетные) яркостные температуры
	Бортовой радиолокационный комплекс БРЛК	Значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) на нескольких природных полигонах, полученные с помощью аналогичных зарубежных спутниковых радиолокаторов на тех же самых полигонах
Геостационарные КА серии “Электро-Л”	Многозональное сканирующее устройство геостационарное МСУ-ГС	SEVIRI/ Meteosat-11 для КА “Электро-Л” № 2 AMI/ GeoKompsat-2A для КА “Электро-Л” №3 AHI/Himawari-9 для КА “Электро-Л” № 4
Высокоэллиптические КА серии “Арктика-М”	Многозональное сканирующее устройство геостационарное МСУ-ГС/ВЭ	VIIRS/Suomi NPP SEVIRI/ Meteosat-11 AHI/Himawari-9

ИНТЕРКАЛИБРОВКА, ВЫПОЛНЯЕМАЯ НА СРЕДСТВАХ СВПН ГМ

С учетом зарубежного опыта и рекомендаций GSICS в «НИЦ “Планета”» разработаны методики (Rublev A., 2018) и техническая документация проведения внешней калибровки / интеркалибровки ЦА в составе отечественных КА серий “Метеор-М”, “Электро-Л”, “Арктика-М” в периоды летних испытаний и длительной эксплуатации на орбите.

Для каналов аппаратуры МСУ-МР и МСУ-ГС, работающих в коротковолновой области спектра, разработаны методики интеркалибровки с использованием расчетов коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы. В качестве референсных данных для МСУ-МР используются измерения радиометра AVHRR, установленного на европейских полярно-орбитальных КА серии MetOp, а для МСУ-ГС – VIIRS, установленного на полярно-орбитальных КА серии Suomi NPP (США). Для интеркалибровки МСУ-МР сопоставление КСЯ проводится над участками земной поверхности с высокой отражательной способностью при отсутствии облачности (например, участки в пустыне Сахара), при этом разница по времени съемки не должна превышать 20 минут, а зенитные углы Солнца и наблюдения отличаются не более, чем на 5 градусов (Филей А.А., 2018). При интеркалибровке МСУ-ГС КСЯ вычисляются для сцен с глубокой конвективной облачностью. Моделирование отраженного от такой облачности

солнечного излучения в каналах приборов осуществляется с помощью быстрой радиационной модели на основе программного кода DISORT (Discrete Ordinates Radiative Transfer), входящего в состав библиотеки libRadtran (www.libradtran.org) (Филей А.А., 2017).

Описанная методика адаптирована для коротковолновых каналов радиометра МСУ-ГС/ВЭ, установленного на высокоэллиптических КА серии “Арктика-М”. На рис. 2 представлен пример интеркалибровки коротковолновых каналов МСУ-МР КА “Метеор-М” № 2-2. Существенного изменения в ходе калибровочных коэффициентов этих каналов не наблюдается.

Интеркалибровка инфракрасных каналов (ИК) радиометра МСУ-МР в области высоких температур (~290 К) заключается в нахождении совмещенных измерений яркостных температур (ЯТ) радиометрами МСУ-МР и SEVIRI над океанической поверхностью в условиях разорванной облачности, соответствующих безоблачной погоде, когда на результаты интеркалибровки не влияют различия в пространственном разрешении приборов. Эта методика особенно полезна при проведении летних испытаний, когда необходимо дать заключение о работоспособности аппаратуры без точной географической привязки (Borisov Ev. et al., 2017). Величины смещений для ИК каналов № 5 и № 6 МСУ-МР по состоянию на февраль 2024 года составляют 0.01 К и –0.76 К соответственно. По результатам регулярно проводимых работ видно, что

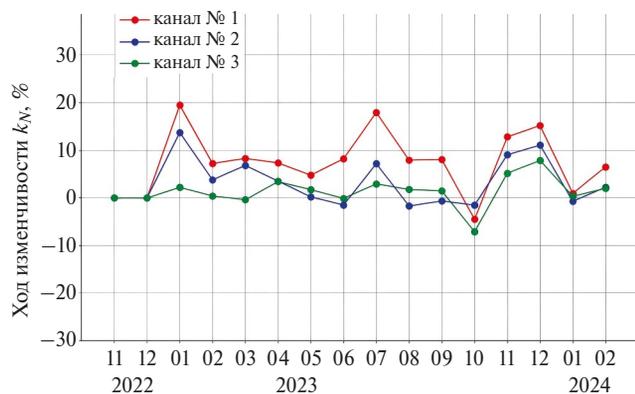


Рис. 2. Калибровочные коэффициенты и их временной ход для коротковолновых каналов радиометров МСУ-МР КА “Метеор-М” № 2-2.

Дата	Канал № 1	Канал № 2	Канал № 3
2022–11	0.95	1.00	1.09
2022–12	0.95	1.00	1.09
2023–01	1.13	1.13	1.11
2023–02	1.02	1.03	1.09
2023–03	1.03	1.06	1.09
2023–04	1.02	1.03	1.13
...
2024–02	1.00	1.02	1.11

каналы МСУ-МР работают стабильно (включая бортовую радиометрическую калибровку) и точность измерений не хуже зарубежных аналогов. Для проверки стабильности радиометрических характеристик МСУ-МР в области низких температур (~220 К) проводится сопоставление с данными наземных измерений на антарктических метеорологических станциях Конкордия и Купол-С 2 (Франция–Италия), когда ЯТ снега в пределах $0.1 \div 0.2$ К совпадает с его температурой.

Для интеркалибровки инфракрасных каналов радиометров МСУ-ГС, устанавливаемых на КА серии Электро-Л, разработаны методики, использующие гистограммный анализ поля яркостных температур и учитывающие реальное пространственное разрешение каналов прибора. Номинальное пространственное разрешение измерений в ИК каналах МСУ-ГС составляет 4 км, а у используемых референсных приборов – 2 км (АНИ, АМІ) и 3 км (SEVIRI). Поэтому для приведения изображений в ИК каналах поверяемого и эталонного радиометров к единому пространственному разрешению данные с лучшим пространственным разрешением “размываются” с использованием функции Гаусса до совпадения с изображениями МСУ-ГС. Подробно методика описана в (Rublev A.N., 2018) и (Rublev A., 2021). На рис. 3 приведены результаты интеркалибровки 9-го и 10-го ИК каналов МСУ-ГС Электро-Л № 4. За время после ввода в эксплуатацию качество информации, получаемой с МСУ-ГС КА Электро-Л № 4, не изменилось.

Регулярно на средствах СВПН ГМ проводились работы по интеркалибровке фурье-спектрометра ИКФС-2 (Zavelevich et al., 2018) и внешней калибровке микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, производимой с использованием методики (Цырульников и др., 2021) и (Успенский и др., 2016). При сопоставлении с непосредственными измерениями SEVIRI оценок яркостной температуры водной поверхности в районе Гвинейского зали-

ва, полученных по данным фурье-спектрометра ИКФС-2 (свернутых со спектральной аппаратной функцией каналов радиометра SEVIRI), выведены следующие калибровочные зависимости: для спектрального диапазона, соответствующего каналу 7.3 мкм SEVIRI $y = 10.019 + 0.963x$; 8.7 мкм $y = 9.347 + 0.968x$; 9.7 мкм $y = 6.757 + 0.976x$; 10.8 мкм $y = 4.826 + 0.984x$; 12.0 мкм $y = 6.167 + 0.979x$; 13.4 мкм $y = 5.149 + 0.981x$, где x – измерения ИКФС-2 в терминах яркостной температуры. На рис. 4 представлены графики смещений измерений ИКФС-2 относительно SEVIRI за 2018–2022 годы. Как видно из рисунка, смещения носят постоянный характер и лежат в пределах 0.1 К для “окна прозрачности” атмосферы, 0.5 К – во всех остальных спектральных диапазонах. Таким образом, ИКФС-2 возможно использовать не только для решения различных тематических задач (определение вертикального профиля температуры и влажности, содержания малых газовых составляющих и др.), но и как эталон для интеркалибровки российских радиометров.

Для каналов МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 2-2 в период с октября 2022 г. по апрель 2023 г. установлена стабильность бортовой и внешней калибровок, см. рис. 5.

ВАЛИДАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ

На средствах СВПН ГМ проводится валидация таких информационных продуктов, как параметры облачности, интенсивность и зоны осадков, температура поверхности океана, вертикальные профили температуры и влажности, вектора ветра, оценки общего содержания малых газовых компонентов в атмосфере и др., созданных по данным ЦА российских космических аппаратов серий “Электро-Л”, “Арктика-М” и “Метеор-М”.

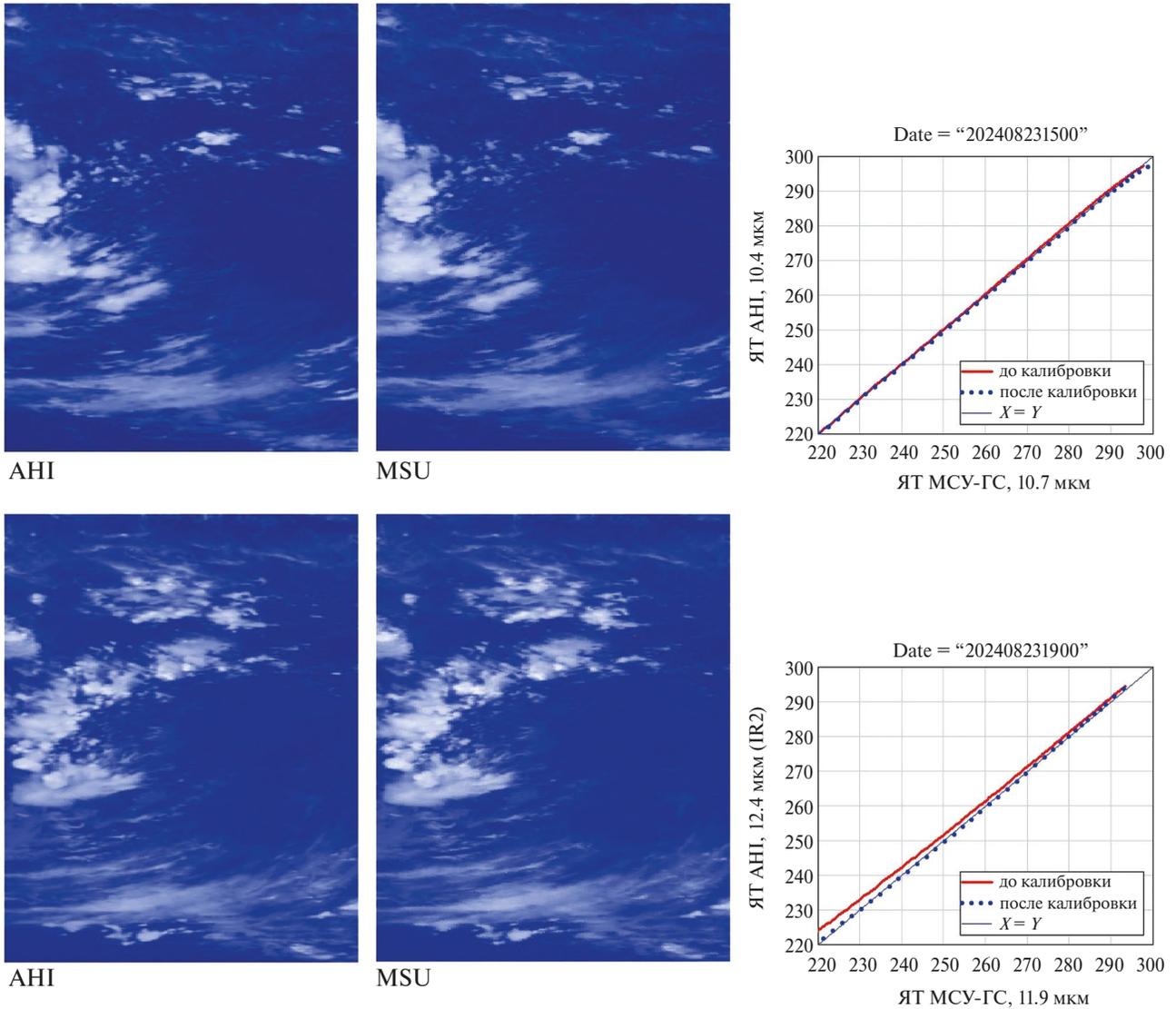


Рис. 3. Сопоставление изображений, полученных в канале № 9 (сверху) и № 10 (снизу) МСУ-ГС КА Электро-Л № 4 и соответствующих каналах 10.45 и IR2 радиометра АНИ японского геостационарного КА Himawari-9.

Валидация спутниковых оценок макро- и микрофизических параметров облачного покрова, детектирования зон осадков разного типа и оценок их интенсивности, а также детектирования опасных явлений погоды проводится ежемесячно в автоматическом режиме путем сравнения с данными наземных наблюдений или климатическими данными. Стоит отметить, что, например, за 2023 год отсутствовало ложное детектирование гроз по спутниковым данным, вероятность корректной оценки сумм осадков была достаточно высокой, детектировались преимущественно на “отлично” облачные классы “кучевообразные”, “слоисто-дождевые”, “высококучевые и мелкие кучевообразные” и “высокостойстые” (Волкова, Кухарский, 2021).

Валидация результатов температурно-влажностного зондирования проводится сравнением с данными радиозондов. Точность оценок профилей температуры, определяемых по данным измерений ИКФС-2 КА “Метеор-М” № 2 (рис. 6а) в атмосферном слое от поверхности Земли до уровня 10 гПа в безоблачных условиях, соответствует теоретическим оценкам – среднее квадратичное отклонение для температуры не превышает 2 К в слое 1000–10 гПа. Результаты температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 2-2 (рис. 6б, в) достаточно хорошо совпадают с данными аэрологического зондирования. Среднее отклонение для температуры в тропосфере не превышает 3 К, а относительной влажности – 20%. Следует отметить, что с учетом достаточно высокой точности

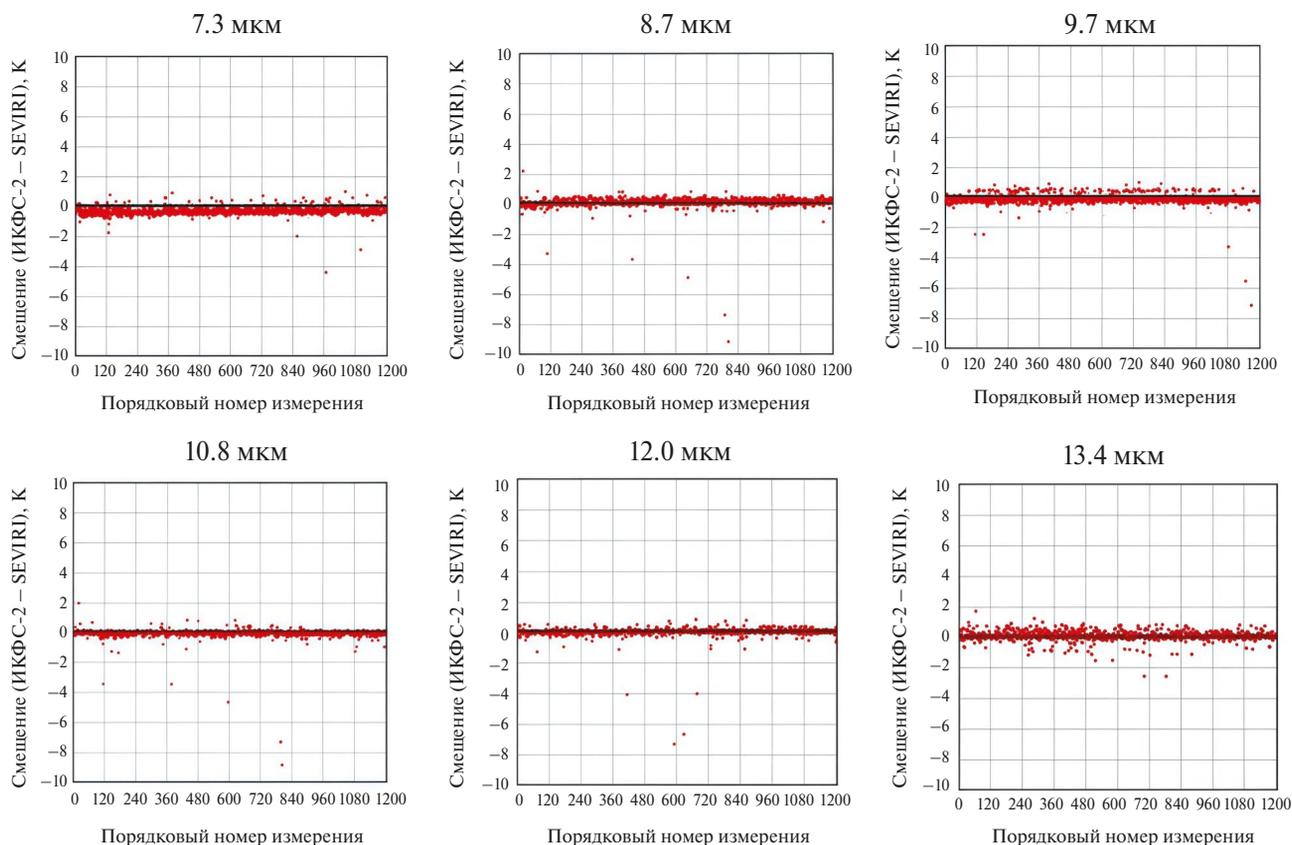


Рис. 4. Мониторинг интеркалибровки фурье-спектрометра ИКФС-2 с использованием измерений SEVIRI.

прогностической продукции для расчета статистики ошибок спутникового зондирования вместо радиозондов можно использовать прогностические профили температуры и влажности.

Валидация оценок температуры поверхности океана (ТПО), регулярно определяемых по данным измерений МСУ-МР КА серии “Метеор-М” при отсутствии облачности, проводится для усредненных значений ТПО в ячейках широтно-долготной сетки. Оценки ТПО сравниваются с ближайшими буйковыми измерениями температуры океана, полученными из базы данных Национального центра буйковых данных США (<https://www.ndbc.noaa.gov/>). Результаты валидации показывают, что среднеквадратичные отклонения оценок ТПО не превышают 1.5 К. Таким образом, оценки ТПО могут быть использованы для ассимиляции в численных моделях прогноза погоды и других приложениях (Фролова и др., 2023).

Оценка точности определения векторов ветра (направление и скорость), рассчитанных по данным измерений МСУ-ГС КА серии Электро-Л, проводится ежедневно для трех слоев атмосферы – нижний (ниже 3 км), средний (3–7 км) и верхний (от 7 км и выше). Метод определения векторов ветра основан на использовании трех спутниковых изо-

бражений, полученных с интервалом времени, не превышающим 30 минут. Сравнение полученных параметров векторов ветра проводится с аналогичными данными радиозондирования в радиусе 150 км от местоположения векторов (Салагина и др., 2018). Результаты валидации показывают, что, например, для КА Электро-Л № 4 в нижнем слое атмосферы (ниже 3 км) общая средняя ошибка определения векторов ветра за год составляет 19.1 градусов по направлению и 4.2 м/с по скорости. В среднем слое атмосферы (от 3–7 км) общая средняя ошибка за год составляет 17.6 градусов по направлению и 5.7 м/с по скорости. В верхнем слое атмосферы (от 7 км и выше) общая средняя ошибка за год составляет 10.3 градусов по направлению и 3.0 м/с по скорости. Общая средняя ошибка определения векторов ветра по всем слоям за год составляет 13.4 градусов по направлению и 4.1 м/с по скорости.

Получаемые на протяжении нескольких лет результаты интеркалибровки ИКФС-2, подтверждающие стабильность его работы, позволили разработать новую методику оценок общего содержания CO_2 . Метод основан на нахождении регрессионной зависимости между оптической толщиной, вычисленной по регистрируемым ИКФС-2 значениям интенсивности излучения в спектральном диапазо-

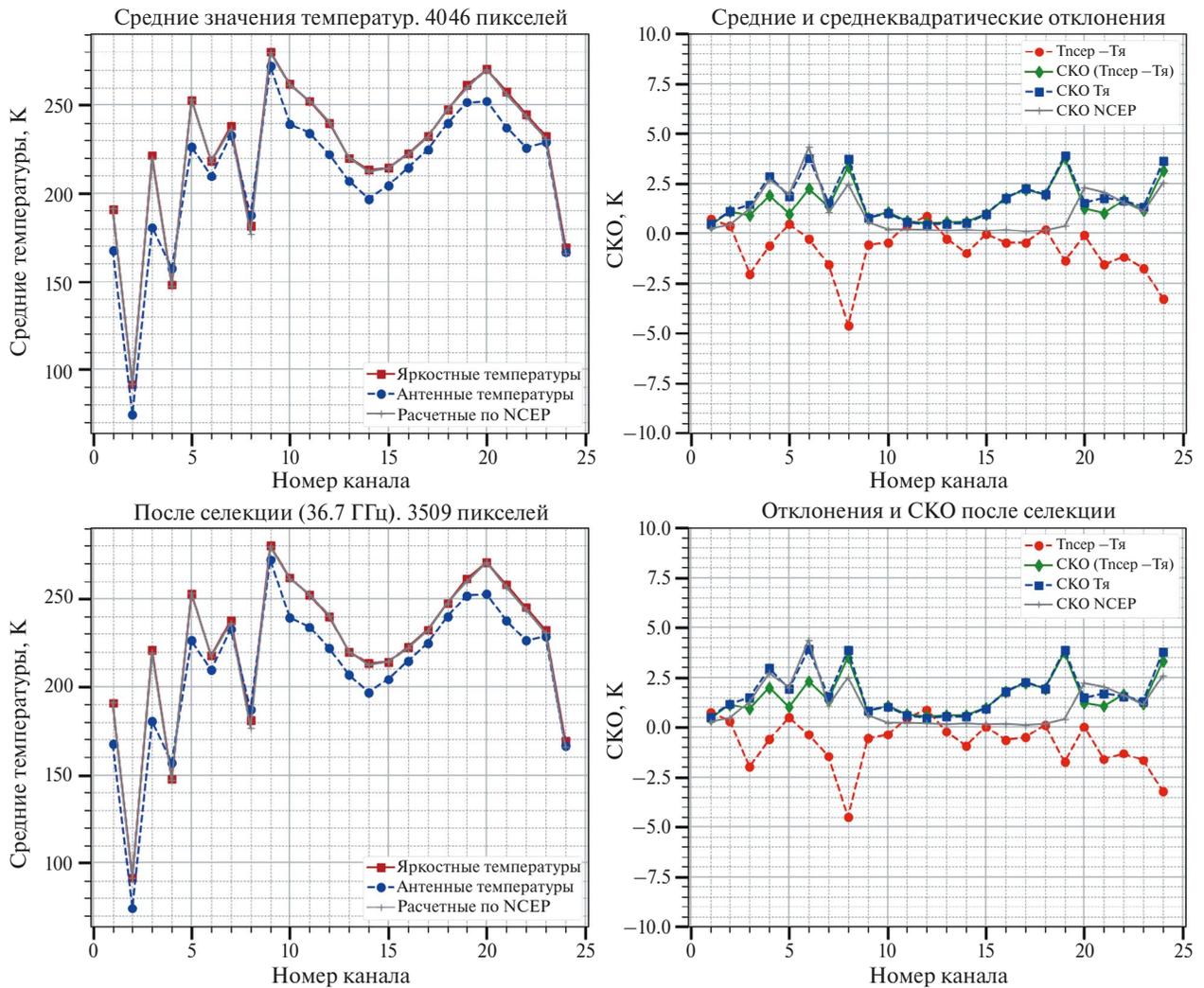


Рис. 5. Мониторинг внешней калибровки микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, полигоны в Тихом океане.

не 10–14 мкм, и оценками концентрации диоксида углерода, полученным на станции ZOTTO и Мауна-Лоа. Валидация полученных значений общего содержания CO_2 проводилась с использованием данных спектрометра ОСО, установленного на КА “ОСО-2” и показала, что среднеквадратическая невязка спутниковых оценок XCO_2 не превышает 4 млн^{-1} (Голомолзин и др., 2022).

САЙТ СИСТЕМЫ ВАЛИДАЦИОННЫХ ПОДСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СВПН ГМ

В соответствии с требованиями GSICS (<https://gsics.wmo.int/en/product-services-and-technical-information>) «НИЦ “Планета”» разработан сайт (Uspensky et al., 2018), на котором предоставляются для авторизованных пользователей архивные и оперативные данные спутниковых измерений по подспутниковым полигонам приборов МТВЗА-

ГЯ, МСУ-МР, ИКФС-2 КА серии “Метеор-М”, а также калибровочные коэффициенты и отчетные материалы по внешней калибровке и валидации информационных продуктов. Примеры отчетов по ЦА и валидации информационных продуктов приведены на рис. 7.

На сайте около 150 зарегистрированных пользователей, среди которых члены GSICS, научные сотрудники российских университетов и организаций РАН. За год на сайте порядка 800 уникальных посетителей, регионы аудитории: Россия, США, Индия, Китай и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим в заключение, что один из ожидаемых результатов работ «НИЦ “Планета”», проводимых в рамках международного сотрудничества по линии GSICS – регистрация в качестве референс-

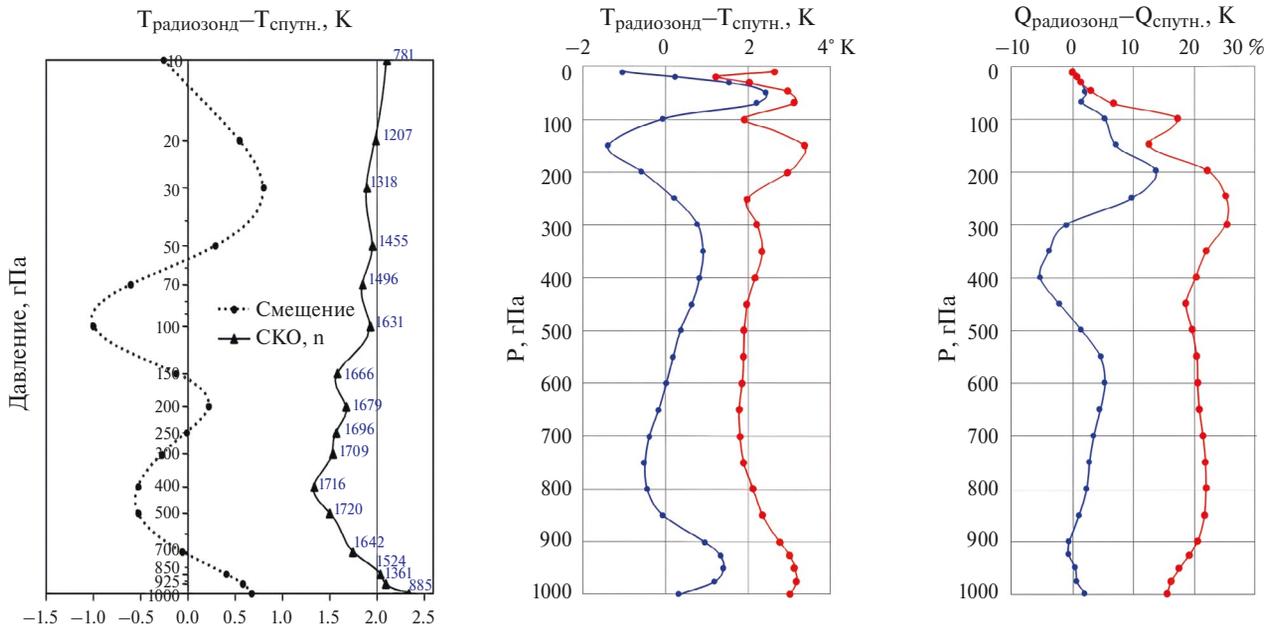


Рис. 6. Оценка точности результатов температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным ИКФС-2 КА Метеор-М № 2 (а), МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 (б), (в).

Отчеты по интеркалибровке

Калибровочные коэффициенты МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2

Выбрать

- Метеор-М №2 - МСУ-МР
- Электро-Л №2 - МСУ-ГС
- Электро-Л №3 - МСУ-ГС
- Метеор-М №2-2 - МСУ-МР
- Электро-Л №4 - МСУ-ГС
- Коротковолновые каналы
- ИК каналы
- Арктика-М №1 - МСУ-ГС/ВЗ

Постоянная ссылка: Электро-Л №4 - Коротковолновые каналы

<< < 2024



Отчеты по валидации

Выбрать категории:

- Параметры облачности и осадков
- Температура подстилающей поверхности
- Вертикальные профили температуры и влажности
- Вектора ветра на различных высотах
- Скорость приводного ветра
- Общее содержание озона в атмосфере
- Общее содержание углекислого газа
- Общее содержание метана
- Параметры снежного покрова
- Границы морского ледяного покрова Арктики

<< < 2024

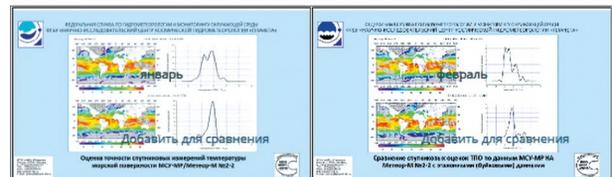


Рис. 7. Страницы по интеркалибровке (слева) и валидации (справа) сайта СВПН ГМ.

ного отечественного ИК-зондировщика ИКФС-2 в составе КА “Метеор-М” № 2 и последующих КА серии “Метеор-М” для проведения интеркалибровок целевой ИК-аппаратуры. К сожалению, КА “Метеор-М” № 2 в настоящее время выведен из эксплуатации, поэтому работы по присвоению ИКФС-2 статуса референсного прибора планируется продолжить при вводе в эксплуатацию очередного ИК-зондировщика этой серии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников ФГБУ «НИЦ “Планета”» Рублева А.Н., Успенского А.Б., Голомолзи-

на В.В. за помощь и советы при разработке методик и подготовке рукописи. Благодарю коллег Кровотынцева В.А., Филя А.А., Волкову Е.В., Тренину И.С., Фролову Е.А., Кухарского А.В., Сизену Е.А., Майоршину А.А., Андрееву З.В., Якушина И.С., Максимова А.А., Василенко Е.В., Екимова Н.С., Ерастова А.Д., Хмельниченко А.В., Федорова Г.А. за участие в разработке компонентов СВПН ГМ и обеспечение ее бесперебойной эксплуатации. Особую благодарность автор выражает разработчикам целевой аппаратуры для метеорологических космических аппаратов Гектину Ю.М., Зайцеву А.А., Андрееву Р.В., Козлову Д.А., Черкашину И.С., Черному И.В. за обсуждения результатов интеркалибровки и ценные советы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы по созданию СВПН ГМ выполнялись в рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. Эксплуатация системы проводится в рамках Федеральной космической программы России на 2016–2025 гг. Государственный Заказчик – Госкорпорация “Роскосмос”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Использование данных МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника “Метеор-М” № 2–2 для мониторинга облачного покрова и подстилающей поверхности над европейской территорией России и Западной Сибирью / Сборник тезисов «Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика”» (МСАРД–2021). 2021. С. 12–18.
- Голомолзин В.В., Рублев А.Н., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Прокушкин А.С., Панов А.В.* Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата “Метеор-М” № 2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 79–95.
- Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В., Березина Е.В., Беликов И.Б., Штабкин Ю.А.* Фотохимическая генерация озона в шлейфах антропогенно загрязненного воздуха по результатам мониторинга на высотной мачте ЗОТГО (Красноярский край) в 2007–2015 гг. // Сборник тезисов “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат–2019”. 2019. С. 154.
- Рублев А.Н., Голомолзин В.В., Успенский А.Б., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Тимофеев Ю.М., Панов А.В., Прокушкин А.С.* Определение общего содержания диоксида углерода в атмосфере по данным спутникового фуль-спектрометра ИКФС-2: анализ и опыт применения // Исследование Земли из Космоса (в печати).
- Салагина А.А., Фролова Е.А., Соловьева И. С., Соловьев В.И.* Валидация векторов ветра, получаемых по данным бортовой аппаратуры МСУ-ГС КА “Электро-Л” № 2 (в рамках эксплуатации Системы валидационных подспутниковых наблюдений) // Сборник тезисов «Шестнадцатая всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”». 2018. С. 59.
- Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Онучин А.А., Панов А.В., Кофман Г.Б., Верховец С.В., Хайманн М.* Многолетний тренд концентрации CO₂ в приземной атмосфере над Центральной Сибирью // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 58–64.
- Успенский А.Б., Асмус В.В., Козлов А.А., Крамчанинова Е.К., Стрельцов А.М., Чернявский Г.М., Черный И.В.* Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.
- Филей А.А., Рублев А.Н., Зайцев А.А.* Радиометрическая кросс-калибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА “ЭЛЕКТРО-Л” № 2 по данным измерений VIIRS КА SUOMI NPP // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 31–38.
- Филей А.А., Рублев А.Н., Киселева Ю.В.* Оценка стабильности радиометрической калибровки коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА “Метеор-М” № 2 // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 71–77.
- Фролова Е.А., Зайцев А.А., Киселева Ю.В.* Валидация оценок температуры поверхности океана по данным МСУ-МР российского космического аппарата Метеор-М № 2-2 // Сборник тезисов «Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика”» (МСАРД – 2023). 2023. С. 34–35.
- Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р., Свиренко П.И., Успенский А.Б.* Усвоение данных спутниковых метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 80–93.
- Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б.* Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 112–126.
- Borisov Ev., Rublev A., Kiseleva Yu.* Inter-Calibration of MSU-GS/Electro-L № 2 and MSUMR/Meteor-M № 2 Radiometers IR Channels // The Eighth Asia/Oceania Meteorological Satellite Users’ Conference, 2017. Vladivostok city, Russian Federation (http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/09/P-51_Kiseleva.pdf).
- Eyre J.R., Bell W., Cotton J., English S.J., Forsythe M., Healy S.B., Pavelin E.G.* Assimilation of satellite data in numerical weather prediction. Part II: Recent years // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2021, pp. 521–556. DOI: 10.1002/qj.4228.
- Fangfang Yu. et al.* GSICS GEO-LEO Inter-Calibration: Operation Status at NOAA/NESDIS // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2009. Vol. 7456. 74560A. P. 1–10. DOI:10.1117/12.826146.
- Global Space-based Inter-Calibration System [Электронный ресурс]: URL: <https://gsics.wmo.int/en/members> (дата обращения: 2024.04.03).
- Murata H., Tabata T., Okuyama A., and Takahashi M.* Inter-comparison of Himawari-8/-9 AH1 using a GEO-GEO approach // GSICS Quarterly Newsletter–Spring 2017 Issue. Vol. 11. Num. 1. Pp. 1–3. DOI:10.7289/V5BK19F0.
- Rublev A.* CAL/VAL system for Russian satellite instruments // GSICS Quarterly Newsletter. 2018. Vol. 12. Num. 1. DOI: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.
- Rublev A.N., Gorbarenko E.V., Golomolzin V.V., Borisov E.Y., Kiseleva Ju.V., Gektin Yu.M., Zaitsev A.A.* Inter-calibration of infrared channels of geostationary meteorological satellite imagers // Frontiers in Environmental Science. 2018. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00142.
- Rublev A., Kiseleva Ju., Uspensky A., Golomolzin V., Gayfulin D., Tsyrunnikov M.* On-orbit calibration of Russian satellite instruments: New issues // GSICS Quarterly Newsletter. 2021. V. 15. № 1. P. 5–6. DOI: 10.25923/m6pq-w122.
- Saunders R.* The use of satellite data in numerical weather prediction // Weather, March 2021. Vol. 76. No. 3. Pp. 95–97.
- Uspensky A., Asmus V., Kiseleva Yu., Krovotyntsev V., Milekhin O., Rublev A., Soloviev V.* Development of Cal/Val website for Russian Meteorological Satellites (тезисы доклада) // Ninth Asia / Oceania Meteorological Satellite Users’ Conference. Jakarta. Indonesia. 2018.
- Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu.* IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // GSICS Quarterly: Winter Issue, 2018. P. 4–6. DOI: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.

The Sub-Satellite Validation System for on-Orbit Calibration Monitoring of Russian Meteorological Satellite Instruments and Satellite Products Validation (CAL/VAL System)

Yu. V. Kiseleva¹

¹Scientific-Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow, Russia

This paper describes the Calibration/Validation (CAL/VAL) System for Russian Meteorological Satellites, developed between 2012 and 2016 by the Research Center “Planeta” (Roshydromet) in collaboration with research institutes of the Russian Academy of Sciences, Roshydromet, and Roscosmos State Corporation. The system is designed for monitoring of on-board calibration, external calibration (including inter-calibration with international satellite), and validation of data products. The CAL/VAL System for Russian Meteorological Satellites was developed to fulfill Roshydromet’s international commitments as a participant in the WMO and a member of the WMO Global Space-Based Inter-Calibration System (GSICS).

Keywords: Inter-calibration, validation, satellite, MSU-MR, IKFS-2, MTVZA-GYA, MSU-GS, CO₂

REFERENCES

- Borisov Ev., Rublev A., Kiseleva Yu. Inter-Calibration of MSU-GS/Electro-L № 2 and MSUMR/Meteor-M №2 Radiometers IR Channels // The Eighth Asia/Oceania Meteorological Satellite Users’ Conference, 2017. Vladivostok city, Russian Federation (http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/09/P-51_Kiseleva.pdf).
- Eyre J.R., Bell W., Cotton J., English S.J., Forsythe M., Healy S.B., Pavein E.G. Assimilation of satellite data in numerical weather prediction. Part II: Recent years // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2021. Pp. 521–556. DOI: 10.1002/qj.4228.
- Fangfang Yu. et al. GSICS GEO-LEO Inter-Calibration: Operation Status at NOAA/NESDIS // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2009. Vol. 7456. 74560A. P. 1–10. DOI:10.1117/12.826146.
- Filey A.A., Rublev A.N., Kiseleva Yu.V. Estimation of the stability of radiometric calibration of multi-channel scanning unit shortwave channels on board Meteor-M no. 2 // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. T. 15. № 4. P. 71–77. (In Russia).
- Filey A.A., Rublev A.N., Zajcev A.A. Radiometric cross-calibration of shortwave channels of multi-channel scanning unit-geostationary of Elektro-1 no. 2 satellite with the use of Suomi NPP VIIRS measurements // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. T. 14. № 7. P. 31–38. (In Russia).
- Frolova Ye.A., Zaytsev A.A., Kiseleva Yu.V. Validatsiya otse-nok temperatury poverkhnosti okeana po dannym MSU-MR rossiyskogo kosmicheskogo apparata Meteor-M No.2-2 // Sbornik tezisov «Mezhdunarodnyy simpozium “Atmosfer-naya radiatsiya i dinamika”» (MSARD – 2023). P. 34–35. (In Russia).
- Global Space-based Inter-Calibration System [Электронный ресурс]: URL: <https://gsics.wmo.int/en/members> (дата обращения: 2024.04.03)
- Golomolzin V.V., Rublev A.N., Kiseleva Yu.V., Kozlov D.A., Prokushkin A.S., Panov A.V. Retrieval of total column carbon dioxide over Russia from Meteor-M no. 2 satellite data // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. № 4. P. 79–95.
- Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Vasilieva A.V., Berezina E.V., Belikov I.B., Shtabkin Yu.A. Fotokhimicheskaya generacia ozona v shlejfhakh antropogenno zagryaznennogo vozdukha po rezultatam monitoring ana visotnoy mache ZOTTO (Krasnoyarsky kray) v 2007–2015 gg. // Sbornik tezisov ‘Izmeneni- yz klimata: prichiny, riski, posledstviya, problema adaptacii I regulirovaniya. Climate-2019’. 2019. P. 154. (In Russia).
- Murata H., Tabata T., Okuyama A., and Takahashi M. Inter-comparison of Himawari-8/-9 AHI using a GEO-GEO approach // GSICS Quarterly Newsletter—Spring 2017 Issue. Vol. 11. Num. 1. Pp. 1–3. DOI: 10.7289/V5BK19F0.
- Rublev A. CAL/VAL system for Russian satellite instruments// GSICS Quarterly Newsletter. 2018. Vol. 12. Num. 1. DOI: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.
- Rublev A.N., Gorbarenko E.V., Golomolzin V.V., Borisov E.Y., Kiseleva Ju.V., Gektin Yu.M., Zaitsev A.A. Inter-calibration of infrared channels of geostationary meteorological satel- lite imagers // Frontiers in Environmental Science. 2018. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00142.
- Rublev A., Kiseleva Ju., Uspensky A., Golomolzin V., Gay-fulin D., Tsyrunnikov M. On-orbit calibration of Russian satel- lite instruments: New issues // GSICS Quarterly Newsletter. 2021. V. 15. № 1. P. 5–6. DOI: 10.25923/m6pq-w122.
- Rublev A.N., Golomolzin V.V., Uspensky A.B., Kiseleva Yu.V., Kozlov D.A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Timofeev Yu.M., Panov A.V., Prokushkin A.S. Derivation of the carbon dioxide total column in the atmosphere from satellite-based infrared fourier-transform spectrometer IKFS-2 measurements: anal- ysis and application experience // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2024. № 4. P. 56–68.
- Salagina A.A., Frolova E.A., Solov’eva I.S., Solov’ev V.I. Vali- datsiya vectorov vetra, poluchaemykh po dannym bortovoy aparatury MSU-GS KA “Electro-L” № 2 (v ramkakh eksplua- tatsii Sistemy validatsionnykh podsputnikovykh nabludenij) // «Shestnadsataya vserossiyskaya otkrytaya konferentsiya “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”». 2018. P. 59. (In Russia).
- Saunders R. The use of satellite data in numerical weather pre- diction // Weather, March 2021. Vol. 76. No. 3. Pp. 95–97.
- Timokhina A.V., Prokushkin A.S., Onuchin A.A., Panov A.V., Kofman G.B., Verkhovets S.V., Heimann M. Long-term trend

- in CO₂ concentration in the surface atmosphere over Central Siberia // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. Т. 40. № 3. P. 186–190.
- Tsyrunikov M.D., Gayfulin D.R., Svirenko P.I., Uspensky A.B.* Assimilation of observations from meteorological satellites in the hydrometcenter of Russia // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. № 12. P. 80–93.
- Tsyrunikov M.D., Svirenko P.I., Gayfulin D.R., Gorbunov M.E., Uspensky A.B.* Development of the data assimilation scheme of the hydrometcentre of Russia // *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2019. № 4 (374). P. 112–126. (In Russia).
- Uspensky A., Asmus V., Kiseleva Yu., Krovotyntsev V., Milekhin O., Rublev A., Soloviev V.* Development of Cal/Val website for Russian Meteorological Satellites (тезисы доклада) // *Ninth Asia / Oceania Meteorological Satellite Users' Conference*. Jakarta. Indonesia. 2018.
- Uspensky A.B., Asmus V.V., Kozlov D.A., Kramchaniniva E.K., Streltsov A.M., Chernyavsky G.M., Cherny I.V.* Absolyutnaya kalibrovka kanalov atmosfernogo zondirovaniya sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYA // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2016. № 5. P. 57–70. (In Russia).
- Volkova E.V., Kukharsky A.V.* Utilizing MSU-MR data from polar-orbiting satellite Meteor-M № 2-2 for monitoring of cloud cover and ground surface over the European territory of Russia and Western Siberia/ *Sbornik tezisov «International symposium “Atmospheric radiation and dynamics” (ISARD–2021)»*. 2021. P. 12–18.
- Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu.* IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // *GSICS Quarterly: Winter Issue*, 2018. P. 4–6. DOI: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.