

**Анализ методов обработки информации
и координации развития космических систем ДЗЗ
гидрометеорологического назначения
в рамках международных программ CGMS и GSICS**

Ю. М. Гектин, к. т. н., *gektin_um@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. М. Зорин, к. т. н., *zorin_sm@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. О. Трофимов, *trofimov_do@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. А. Барсуков, *barsukov_ia@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

К. И. Жуковская, *zhukovskaya_ki@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Международная координация работ по калибровке и валидации гидрометеорологических спутниковых данных привела к формированию под эгидой ВМО (Всемирная метеорологическая организация, WMO) двух основных международных программ — CGMS и GSICS, в рамках которых ежегодно проводятся заседания с участием представителей нескольких стран, включая Российскую Федерацию (Росгидромет, Роскосмос). В работе представлен анализ основных направлений развития систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) гидрометеорологического назначения по результатам рассмотрения докладов и участия представителей АО «Российские космические системы» в международных мероприятиях CGMS-47 и GSICS-EP-20 (Россия, г. Сочи, 16–24 мая 2019 г.).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), космический аппарат (КА), калибровка, валидация, Всемирная метеорологическая организация, координационная группа по метеорологическим спутникам, Глобальная система интеркалибровки спутниковых данных

Data Processing Methods and the Coordination of the Development of Hydrometeorological ERS Space Systems as Part of the CGMS and GSICS International Programs

Yu. M. Gektin, *Cand. Sci. (Engineering)*, gektin_um@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. M. Zorin, *Cand. Sci. (Engineering)*, zorin_sm@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. O. Trofimov, trofimov_do@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. A. Barsukov, barsukov_ia@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

K. I. Zhukovskaya, zhukovskaya_ki@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The international coordination of efforts in hydrometeorological satellite data calibration and validation has led to the organization of two main international programs under the auspices of the World Meteorological Organization (WMO) – CGMS and GSICS. Within the programs, annual meetings are held with participants from several countries, including the Russian Federation (Roshydromet, Roscosmos). The paper presents an analysis of the key focus areas of development of hydrometeorological Earth Remote Sensing (ERS) systems in accordance with reports and results of the participation of representatives of Joint Stock Company "Russian Space Systems" in the CGMS-47 and GSICS-EP-20 international meetings (Sochi (Russia), May 16–24, 2019).

Keywords: Earth Remote Sensing (ERS), spacecraft, calibration, validation, WMO – World Meteorological Organization, CGMS – Coordination Group for Meteorological Satellites, GSICS – Global Space-based Inter-Calibration System

Введение

Координационная группа по метеорологическим спутникам CGMS была образована в 1972 году. Росгидромет присоединился к CGMS в 1973 году. В настоящее время членами CGMS также являются Госкорпорация по космической деятельности «Роскосмос», Китайская метеорологическая администрация (CMA), Китайское национальное космическое управление (CNSA), Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT), Европейское космическое агентство (ESA), Французское космическое агентство (CNES), Индийская организация космических исследований (ISRO), Индийский метеорологический департамент (IMD), Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA), Японское метеорологическое агентство (JMA), Корейская метеорологическая администрация (KMA), Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США (NASA), Национальное управление океанических и атмосферных исследований США (NOAA), Всемирная метеорологическая организация (WMO), Межправительственная океанографическая комиссия ЮНЕСКО (IOS-UNESCO)

Кроме того, в состав CGMS со статусом наблюдателей входят Канадское космическое агентство (CSA), Глобальная система наблюдений за климатом (GCOS), Корейский институт аэрокосмических разработок (KARI), Корейский институт океанических исследований и развития (KORDI), Государственное океанографическое управление Китая (SOA).

Международная рабочая группа по Глобальной системе интеркалибровки спутниковых данных GSICS была образована совместно ВМО и CGMS в 2005 году с целью мониторинга и улучшения качества наблюдений с оперативных метеорологических спутников Глобальной системы наблюдений ВМО.

Росгидромет и Роскосмос имеют своих представителей в CGMS и GSICS, используют участие в работе этих международных мероприятий для выработки общих подходов к формированию данных космической съемки, более эффективного проведения работ по калибровке/валидации информационных данных отечественных метеоспутников и совершенствования аппаратуры с целью повышения точности и стабильности радиометрических измерений, а также точности их геопривязки.

шенствования аппаратуры с целью повышения точности и стабильности радиометрических измерений, а также точности их геопривязки.

Основные принципы организации работ метеорологических агентств, космических агентств и операторов КА ДЗЗ по калибровке/валидации спутниковых данных

Спутниковые данные для мониторинга климата и других задач гидрометеорологии требуют точной калибровки, согласованной для различных однотипных приборов и обеспечивающей в течение длительного времени штатной эксплуатации КА хорошее соответствие с данными референсного (эталонного) прибора. Работы в рамках Международной системы калибровки и валидации спутниковых приборов, координируемых CGMS и GSICS, имеют важное значение как для исследования климатических процессов, так и для совершенствования организационных, аппаратурных, технологических и методических аспектов всех видов калибровок.

Основная идея интеркалибровки заключается в том, что два КА проводят съемку одной и той же территории в одно и то же время, с одинаковыми пространственными характеристиками и геометрией обзора. В результате интеркалибровки нужно количественно определить относительную погрешность измерений между проверяемым и эталонным приборами для конкретной тандемной съемки, найти причины несоответствия данных, скорректировать или устранить их.

Как показано в работе [1] на примере аппаратуры МСУ-МР, интеркалибровка двух приборов разных космических аппаратов требует точного согласования в 8-мерном пространстве, включающем время, широту, долготу, высоту, солнечный зенитный угол, угол обзора по азимуту, зенитный угол наблюдения и спектральный диапазон. Значительные погрешности в любой из перечисленных составляющих могут привести к случайным и систематическим ошибкам, что впоследствии приведет к неточностям измерения.

Выбор эталонного прибора также вызывает сложности — ключевой его характеристикой должна являться радиометрическая стабильность, но нужно учитывать и другие важные факторы (орбиты спутников должны позволять проводить съемку одних и тех же территорий, приборы должны иметь схожие спектральные характеристики и др.). Кроме того, эталонный прибор выбирается путем проверки качества и признания его таковым странами — членами международного сообщества в рамках CGMS и GSICS с учетом малых погрешностей радиометрических измерений, долговременной стабильности измерительных характеристик, а также условий и точности наземной радиометрической калибровки и наличия высокостабильной системы бортовой калибровки.

Например, как показано в [1, 2], для аппаратуры МСУ-МР и МСУ-ГС видимого диапазона в качестве опорных радиометров использовались соответственно AVHRR (КА MetOp, Евросоюз) и VIIRS (КА Suomi NPP, США).

А для интеркалибровки спутниковой ИК-аппаратуры в настоящее время в рамках GSICS в качестве основного эталонного прибора используется интерферометр IASI (КА MetOp, Евросоюз). Кроме того, для интеркалибровки могут использоваться данные инфракрасного (ИК) зондировщика AIRS (КА Aqua, США).

Помимо IASI и AIRS в качестве промежуточных эталонов для ИК-диапазона спектра используется ряд приборов, стабильность и точность радиометрических характеристик которых была подтверждена в ходе различных интеркалибровок целевой аппаратуры (ЦА):

- ИК-зондировщик CrIS/SNPP (работы по проверке качества абсолютной калибровки завершились в 2013 г.);

- сканирующий радиометр MODIS/EOS Terra, Aqua;

- сканирующий радиометр AVHRR/NOAA;

- сканирующий радиометр VIIRS/SNPP;

- сканирующий радиометр SEVIRI/Meteosat 10.

Данные измерений перечисленных приборов (регионального и глобального покрытия) имеются в открытом доступе или могут быть получены из спутниковых архивов, поддерживаемых NOAA, NASA, EUMETSAT и используются для интерка-

либровки данных космической съемки ЦА, установленной на КА серий «Метеор-М», «Электро-Л», «Канопус-В-ИК» [1–3].

Опыт разработки и эксплуатации целевой аппаратуры микроволнового диапазона (например, микроволновых сканеров/зондировщиков температурно-влажностного зондирования атмосферы МТВЗА и МТВЗА-ГЯ для КА «Метеор-3М» № 1 и КА серии «Метеор-М») подтверждает необходимость создания процедур интеркалибровки и внешней калибровки спутниковых данных. В настоящее время микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ является одним из основных видов целевой аппаратуры на метеорологических спутниках серии «Метеор-М». По информационным характеристикам и области применения МТВЗА-ГЯ соответствует зарубежным аналогам — зондировщикам AMSU-A и AMSU-B (КА NOAA, США и MetOp, Евросоюз), ATMS (КА Suomi NPP, США) [4], сканерам AMSR-E (КА Aqua, США), AMSR2 (КА GCOM-W1, Япония) [4] и сканеру/зондировщику SSMIS (КА DMSP F16–F19, США).

Для внешней калибровки микроволновых сканеров/зондировщиков выполняются сопоставления измеренной антенной температуры (отсчетов) и расчетной яркостной температуры над протяженными однородными «холодными» и «горячими» участками океана и земной поверхности [4, 5]. В качестве «горячей» области используются широколиственные леса бассейна Амазонки, при этом выбираются измерения на витках, когда над участком со сплошным лесным покровом отсутствует мощная облачность и осадки. «Холодные» области выбираются над отдельными районами Антарктиды и над районами океана с температурой поверхности воды от 0 до +12 °С, слабым ветром, отсутствием облаков и низкими значениями паросодержания атмосферы [4].

Для интеркалибровки пассивных измерений микроволновых приборов типа сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ в качестве зарубежных референсных приборов можно использовать прежде всего аппаратуру с коническим режимом сканирования — сканеры/зондировщики SSMIS (КА DMSP F16–F19, США), AMSR-E/EOS (КА Aqua, США), AMSR2 (КА GCOM-W1, Япония). При отсутствии доступа к информации указанных приборов для интерка-

либровки данных в отдельных каналах МТВЗА-ГЯ с определенными ограничениями можно использовать измерения микроволновых зондировщиков AMSU-A и AMSU-B (КА NOAA, США и MetOp, Евросоюз) и ATMS (КА Suomi NPP и JWSS, США) с поперечным режимом сканирования.

Краткий обзор состояния зарубежных спутниковых группировок и целевой аппаратуры гидрометеорологического назначения по результатам докладов на заседаниях CGMS-47 и GSICS-EP-20 (г. Сочи, Россия, 16–24 мая 2019 г.)

Лидирующее положение в вопросах координации и организации международного сотрудничества в вопросах глобальных спутниковых систем наблюдения за метеорологическими (и смежными с ними) параметрами в целях анализа и прогноза состояния

окружающей среды, в том числе опасных явлений погоды и их заблаговременного предупреждения, занимают США, Евросоюз, Япония и Китай.

Соответственно важен анализ состояния спутниковых группировок и ЦА гидрометеорологического назначения в первую очередь указанных стран.

США (NASA, NOAA)

На рис. 1, 2 представлен состав действующей и перспективной группировок гидрометеорологических спутников США из доклада NASA [6].

По состоянию на май 2019 г. США имеют 23 действующих гидрометеорологических спутника (NASA), без учета геостационарной космической системы GOES (NOAA). С момента прошлого заседания CGMS-46 было запущено 10 новых миссий, включающих: ICESat-2, GRACE-FO, OSO-3, ECOSTRESS, GEDI и пять ультракомпактных КА (типа CubeSat): RainCube, Cube RRT, CSIM-FD, TEMPEST-D, MinXSS-2. В период 2019–2025 гг. NASA планирует запустить еще 15 миссий, в их числе TEMPO, Landsat-9, 10, Sentinel-6A/B, SWOT, PACE, CLARREO-PF и др. (рис. 1). Таким



Рис. 1. Группировка гидрометеорологических спутников ДЗЗ США [6]



Рис. 2. Состав действующей и перспективной группировок спутников ДЗЗ США [6]

образом, суммарный состав группировки гидрометеорологических спутников США превысит 30 КА.

При этом на данный момент в составе группировки спутников ДЗЗ США есть значительное число КА со сроком службы 15–20 лет, которые продолжают успешно функционировать (рис. 2).

Также увеличивается количественный и качественный состав аппаратуры ДЗЗ США (LIS, SAGE III, TSIS-1, OCO-3, ECOSTRESS, GEDI, CLARREO-PF, EMIT) на международной космической станции (МКС) (рис. 3) [7].

Необходимо отметить, что в 2017–2019 гг. были запущены и введены в эксплуатацию ультракомпактные КА (типа CubeSat), такие как MiRaTA, HARP, RAVAN, IceCube, RainCube, TEMPEST-D, CubeRRT, CIRiS, которые подтвердили перспективность развития данного направления ДЗЗ в США.

Кроме того, в NASA и NOAA явно обозначены тенденции по коммерциализации всех звеньев создания и функционирования КА от разработки техники до распространения данных ДЗЗ, формирования прогнозов погоды и климата.

По состоянию на сентябрь 2018 г. были заключены контракты в рамках пилотных коммерческих программ по созданию многоспутниковых систем на основе малых КА:

- DigitalGlobe, 5 спутников наблюдения Земли с разрешением до 30 см (GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4);

- Planet (ранее Planet Labs), три спутниковые системы (SkySat, Dove, RapidEye) с группировкой более 150 спутников наблюдения Земли со средним и высоким разрешением и высокой частотой обновления данных;

- SPIRE, более 60 спутников с приборами радиозатменного зондирования, определения координат летательных аппаратов и судов.

Евросоюз (ESA, EUMETSAT)

Спутниковая группировка Евросоюза по состоянию на май 2019 г. содержит 15 действующих спутников, 25 находятся в разработке, 12 готовятся к запуску. За последнее время можно отметить успешный запуск и ввод в эксплуатацию КА Sentinel-5P (октябрь 2017 г.), Sentinel-3B (апрель 2018 г.), Aeolus (август 2018 г.), MetOp-C (ноябрь 2018 г.).

На рис. 4 представлен план-график развития спутниковой группировки ESA до 2040 г. [8]. Следует отметить представленные согласованные планы NASA и ESA (программа Copernicus) по развитию



Рис. 3. Состав аппаратуры ДЗЗ США на МКС [7]

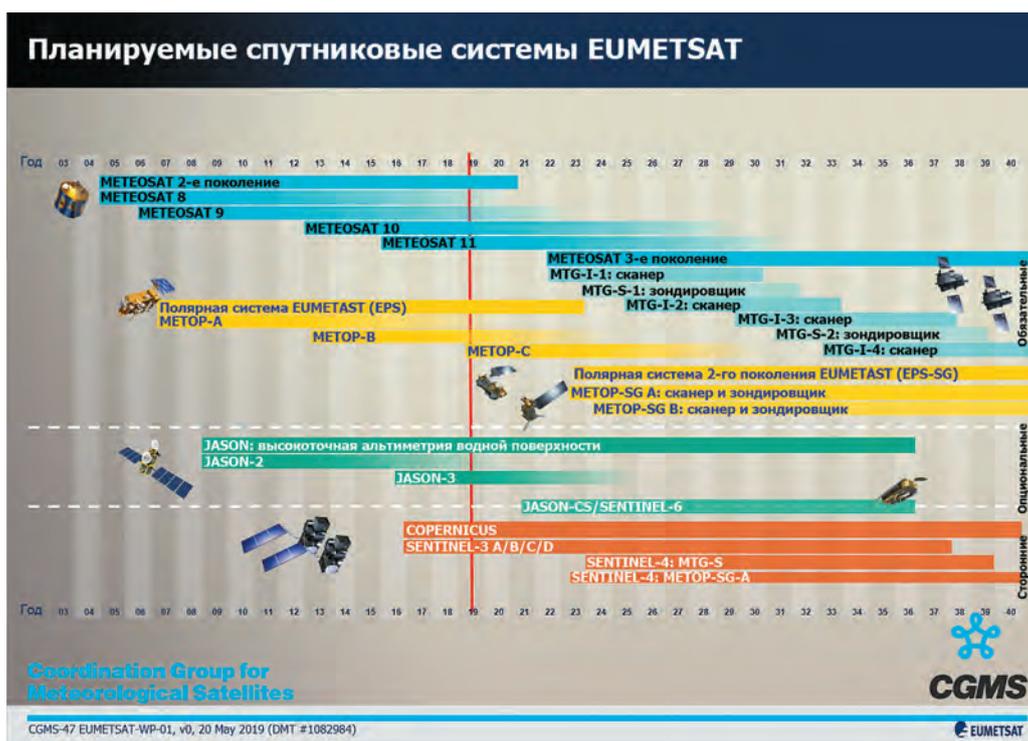


Рис. 4. Спутниковая группировка ДЗЗ Евросоюза [8]

научной составляющей программ наблюдения Земли из космоса, которые предполагают создание новых приборов, нацеленных на изучение качества атмосферного воздуха, состава атмосферы, опреде-

ление содержания углекислого газа, озона, метана и других парниковых газов, а также на изучение интенсивности процессов фотосинтеза и роста растений.

Перечисленные задачи требуют создания принципиально новых приборов, таких как спектрометры сверхвысокого спектрального разрешения FLEX (Fluorence Explorer), OCO (Orbiting Carbon Observatory), GeoCarb (Geostationary Carbon Cycle Observatory), а также ИК-радиометры и спектрометры с чувствительностью в дальнем ИК- и микроволновом диапазонах, такие как CORSAIR (Calibrated Observations of Radiance Spectra in the Far-Infrared), CLARREO (Climate Absolut Radiance and Refractivity Observatory), ECOSTRESS (ECOSystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station), ICESat-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite 2), GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), а также ряд приборов в рамках программы MeTop-SG — MWI, MWS, ICI и др.

Япония (JAXA, JMA)

Основные КА японской программы наблюдения Земли из космоса представлены на рис. 5 [9].

Японская аппаратура гидрометеорологического назначения, помимо приборов видимого, ближнего ИК- и ближнего УФ-диапазонов (SGLI), включает

также ИК-радиометры (IRS, VNR, АНИ), ИК-фурье спектрометры (TANSO-FTS), приборы наблюдения за парниковыми газами (КА Ibuki, 7 приборов) и микроволновые радиометры (GMI, AMSR). Необходимо отметить тесное сотрудничество японских агентств JAXA и JMA с соответствующими агентствами США и Евросоюза. На заседаниях рабочих групп GSICS и CGMS часто обсуждаются вопросы интеркалибровки ИК-радиометров АНИ (Advanced Himawari Imager), которые изготовлены с участием США (аналоги ABI), установлены на КА Himawari-8, 9 и хорошо себя зарекомендовали при длительной эксплуатации, подтвердив сходства с данными, полученными с приборов IASI и CrIS/SNPP (США). На заседаниях WGII со стороны представителя США была выражена особая заинтересованность в данных микроволнового сканера с коническим сканированием и обеспечении запуска AMSR-3 в 2022–2023 гг.

Китай (CMA, CNSA)

На рис. 6 представлены история и стратегия запусков гидрометеорологических КА китайской программы наблюдения Земли из космоса [10].

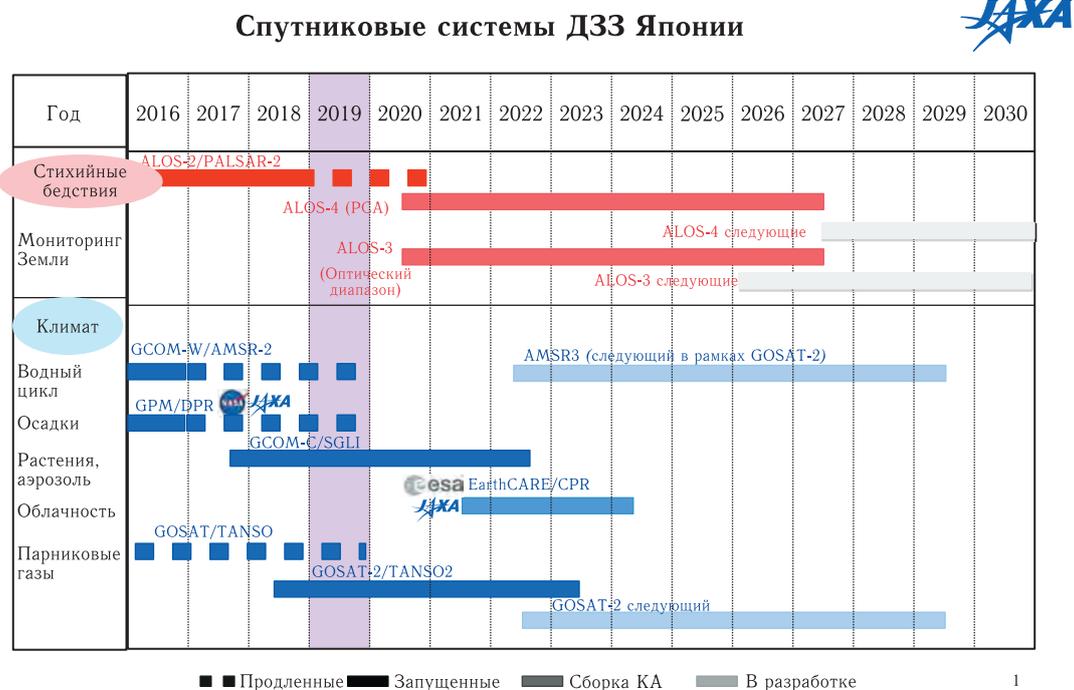


Рис. 5. Японская аппаратура гидрометеорологического назначения [9]



Рис. 6. История и стратегия запусков гидрометеорологических КА по программе КНР Фэнъюнь (Fengyun) [10]

На данный момент на орбите работают 7 КА КНР (4 на геостационарной и 3 на низкой околоземной орбитах). Геостационарный КА FY-2H запущен в июне 2018 г. и принят в эксплуатацию в январе 2019.

В составе ЦА китайской группировки представлен весь спектр приборов мониторинга атмосферы, океана, Солнца и Луны, МСУ, микроволновые сканеры-зондировщики, ИК-фурье-спектрометры (ИКФС), регистраторы молний (lightning mapper) и т. д.

С 2019 по 2023 гг. планируется запустить 6 новых КА (FY-3E, FY-4B, FY-4F, FY-RM, FY-4C, FY-3G) (см. рис. 6) [10].

В докладе СМА на GSICS отмечалось, что КНР планирует масштабные проекты по изучению Луны, которые помогут получить также и необходимые данные для радиометрической калибровки аппаратуры ДЗЗ по лунному диску.

В ряде докладов специалистов КНР сообщается о проекте разработки национального радиометриче-

ского эталонного стенда космического базирования (Space-based Radiometric Benchmark) с целью проведения радиометрических калибровок ЦА в абсолютных единицах системы СИ (рис. 7) [10].

Основные исполнители проекта:

- Академия оптоэлектроники (АОЕ), Китайская академия наук (CAS);
- Национальный спутниковый метеорологический центр (NSMC), СМА;
- Шанхайский институт технической физики (SITP), CAS;
- Хэфэйский институт естественных наук (HIPS), CAS.

Этап Б (2018–2022 гг.) предполагает финансирование 300 млн юаней (около 3 млрд руб.) [10], что говорит о значимости данного направления в планах развития систем ДЗЗ. Данная программа предусматривает такие исследования в области метрологии, как измерения характеристик АЧТ, коэффициентов излучения различных материалов, создание бортовых АЧТ с применением



Рис. 7. Радиометрический эталонный стенд космического базирования КНР [10]

калибровочных ячеек на фазовых переходах сплавов галлия, воды и органических веществ, применение лазерной техники.

Данный подход позволит снизить неопределенность калибровки по температуре полостного бортового АЧТ до 10 мК для диапазона температур от 270 до 350 К (коэффициент излучения не менее 0,997 и погрешность воспроизведения температуры не более 0,15 К).

Заключение

Таким образом, можно выделить следующие основные направления развития КС ДЗЗ гидрометеорологического назначения.

1. В части точных радиометрических измерений для прогноза погоды, мониторинга состояния климата, акваторий морей и океанов большое внимание уделяется приборам ИК-диапазона, таким как многозональные сканирующие устройства (МСУ), ИК-фурье-спектрометры (ИКФС), а также микроволновые пассивные

сканирующие радиометры. Основные требования к этим приборам состоят в долговременной стабильности измерительных характеристик и минимально достижимых инструментальных погрешностях. Так, например, представленные результаты интеркалибровки Himawari-8/АНИ (Япония), проведенной в 2019 г., при сличении с данными эталонных приборов MetOp-A/IASI (США) и SNPP/CrIS (США) показали стандартное отклонение измеренных температур в разных ИК каналах от 0,005 до 0,039 К, а значения систематической погрешности от 0,01 до 0,24 К за год. Эти данные подтверждают очень высокую стабильность и точность измерений радиационной температуры зарубежной ИК-аппаратуры.

2. Признано, что алгоритмы GSICS и эталонные приборы GSICS (IASI, CrIS, L1 Microwave SSMIS, AMSR-E, AMSR-2, MSU/AMSU FCDR) могут быть использованы для мониторинга и рекалибровки соответствующих российских приборов МСУ-ГС, МСУ-МР, ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ.

3. В рамках GSICS в период до марта 2019 г. проводились работы по интеркалибровке

следующей ИК аппаратуры: Meteosat-8-11/SEVIRI (EUMETSAT), MTSAT-2 Imager, Himawari-8-9/AHI (JMA); GOES-11, -12, -15 Imager, GOES-16, -17/ABI (NASA/NOAA); FY-2C,D,E,F,G/VISSR, FY-4A/AGRI/GIIRS (CMA); COMS, KOMPSAT-2A (KMA); INSAT-3D/Imager, INSAT-3D/Sounder/Imager, INSAT-3R (ISRO); «Метеор-М»/ИКФС-2, «Электро-Л»/МСУ-ГС, «Метеор-М»/МСУ-МР (Росгидромет, Роскосмос).

4. Отмечена перспективность проведения работ по использованию лунной калибровки аппаратуры, разработке соответствующих алгоритмов и расчетных моделей.

5. Космическим агентством КНР запланирован масштабный проект разработки национально-го радиометрического эталонного стенда космического базирования (Space-based Radiometric Benchmark) с целью проведения радиометрических калибровок ЦА от видимого до ИК-диапазона в абсолютных единицах системы СИ с высокой точностью.

6. Современные вызовы, связанные с большим количеством успешных стартапов в области многоспутниковых систем на базе малых КА, существенным образом трансформировали рынок ДЗЗ. Эксперты предполагают, что к 2023 г. на орбитах появится более 1100 новых спутников ДЗЗ. Только четыре компании (Planet (ранее Planet Labs), Maxar, Spire и BlackSky Globe) планируют за этот период запустить более 970 спутников [11]. При этом необходимо отметить, что многоспутниковые системы ДЗЗ на основе малых КА (типа CubeSat) на данном этапе предназначены для высокооперативного наблюдения и не решают задач точных радиометрических измерений характеристик атмосферы, океана и поверхности Земли в различных спектральных диапазонах. Однако, например, NASA выполняет большое количество проектов на основе КА типа CubeSat в рамках программы Earth Science Technology Program Elements (ESTO), которые предполагают создание ультракомпактной ЦА, включая ИК-гиперспектрометры (HyTI), спектрометры солнечного излучения (STIM), радиолокационные радиометры (SNoOPI, RainCube, TEMPEST-D), гиперспектральные трассовые спектрометры (TACOS) и т. д.

7. Все большее внимание уделяется спутниковым системам ДЗЗ арктической зоны, которые

предназначены для обеспечения исследований, контроля и прогнозирования состояния атмосферы, океана, арктических морских льдов, прибрежной зоны, высоты снежного покрова, аномальных явлений в приполярных районах.

8. Следует отметить, что в России большую часть работы по распространению данных ЦА гидрометеорологического назначения, оценке качества полученных данных, проведению интеркалибровки и представлению научно-технических и организационных результатов в рамках GSICS и CGMS проводит Росгидромет, в частности ФГБУ «НИЦ «Планета». Однако, эта работа невозможна без участия предприятий — разработчиков бортовой аппаратуры. Например, АО «Российские космические системы» является разработчиком и изготовителем такой бортовой аппаратуры, как многозональные сканирующие устройства МСУ-МР (КА «Метеор-М»), МСУ-ГС (КА «Электро-Л», «Арктика-М»), МСУ-ИК-СРМ (КА «Канопус-В-ИК»), МСУ-МР-МП (КА «Метеор-МП»), инфракрасный радиометр высокого разрешения (РИВР) для многоцелевого лабораторного модуля «Наука» МКС, сканеров/зондировщиков МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М») и МТВЗА-ГЯ-МП (КА «Метеор-МП»).

Все вышеперечисленные приборы имеют особенности декодирования и обработки поступающей информации при штатной эксплуатации, особенности измерительных трактов спектральных каналов, особенности наземной и бортовой калибровки, что требует полетного сопровождения данной целевой аппаратуры специалистами разработчика при оценке качества данных космической съемки для исключения систематических ошибок при проведении интеркалибровок.

В докладах, представленных специалистами АО «Российские космические системы» на GSICS-EP-20 и CGMS-47, авторы-разработчики сканеров/зондировщиков МТВЗА-ГЯ (КА серии «Метеор») [5], многозональных сканирующих устройств МСУ-ГС (КА «Электро-Л») [12] и МСУ-ИК-СРМ (КА «Канопус-В-ИК») [13] описывают принципы работы, основные технические характеристики и особенности бортовой калибровки аппаратуры с учетом оценки полученных данных космической съемки, в том числе на основе интеркалибровки.

В частности, в докладе [12] отмечено, что оценка метрологических характеристик радиометра МСУ-ГС в составе КА «Электро-Л» №2 в сравнении с радиометрами VIIRS (КА Suomi NPP, схема GEO-LEO) и SEVIRI (КА Meteosat-10, схема GEO-GEO), показала хорошее соответствие получаемых этими приборами радиометрических данных, а также возможность построения на основе данных космических съемок МСУ-ГС тематических продуктов, соответствующих мировым стандартам качества.

Результаты интеркалибровки радиометра МСУ-ИК-СРМ (КА «Канопус-В-ИК») [13] с использованием в качестве опорных приборов IASI (КА MetOp-A,B) и ИКФС-2 (КА «Метеор-М» №2) показали, что относительная разность радиометрических данных в канале 2 МСУ-ИК-СРМ по сравнению с данными IASI (MetOp-B) и ИКФС-2 для спектральной плотности энергетической яркости на эффективной длине волны не превышает 5%. Это свидетельствует о хорошем качестве абсолютной калибровки МСУ-ИК-СРМ.

Таким образом, интеркалибровка является хорошим инструментом для отслеживания метрологических характеристик космических радиометров при условии минимизации методических ошибок, связанных с согласованием времени, широты, долготы, высоты, солнечного зенитного угла, угла обзора по азимуту, зенитного угла наблюдения и спектрального диапазона при съемке одного объекта двумя различными приборами.

Список литературы

1. Филей А.А., Рублев А.Н., Зайцев А.А. Радиометрическая интеркалибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» №2 по радиометру AVHRR КА «MetOp-A» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, т. 13, №6. С. 251–263.
2. 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 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, №7. С. 31–38.
3. Rublev A.N., Gorbarenko E.V., Golomolzin V.V., Borisov E.Y., Kiseleva J.V., Gektin Y.M., Zaitsev A.A. Inter-calibration of Infrared Channels of Geostationary Meteorological Satellite Imagers // *Frontiers in Environmental Science*, doi: 10.3389/fenvs.2018.00142, November 2018, volume 6, article 142.
4. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Чёрный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» №2 // Исследование Земли из космоса, 2018, т. 15, №4. С. 78–100.
5. Cherny I.V., Chernyavsky G.M., Barsukov I.A., Streltsov A.M., Egorov A.N., Gavrillov M.I., Yakovlev V.V. Calibration of microwave imager/sounder MTVZA-GY onboard «Meteor» satellites series // *Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-ROSCOSMOS-WP-02*, 18 p. // CGMS-47, WGII: Satellite Data and Products, CGMS agency reports on highlights issues in dataset and product generation. <http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47> (Доступ свободный).
6. Kaye J. NASA Report on the Status of Current and Future Earth Satellite Systems // *Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, Working Paper CGMS-47-NASA-WP-01*, 23 p. // CGMS-47, Plenary Session. <http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47> (Доступ свободный).
7. Butler J., Xiong J. Report from NASA // *Materials from GSICS-EP-20, Russian Federation, Sochi, 2019 // GSICS-EP-20* https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/GSICS-EP-20/documents/GSICS-EP-20_Doc_5.10p_NASA_agency_report_050819.pdf (Доступ свободный).
8. EUMETSAT development and plans since CGMS-46 // *Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47 EUM-WP-01 PPT*, 11 p. // CGMS-47, Plenary Session. <http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47> (Доступ свободный).
9. Hitoshi Tsuruma JAXA Earth Observation Program // *Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-JAXA-WP-01 PPT*, 15 p. // CGMS-47, Plenary Session. <http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47> (Доступ свободный).
10. Zhang Peng Updated report on Fengyun satellite program and development // *Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-CMA-WP-01 PPT*, 32 p. // CGMS-47,

- Plenary Session. <http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47> (Доступ свободный).
11. *Бакланов А.И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 14–27.
 12. *Gektin U.M., Zorin S.M., Trofimov D.O., Zaitsev A.A.* The functional and calibration features of the multispectral scanner MSU-GS onboard Elektro-L No. 2 // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-ROSCOSMOS-WP-01, 9 p. // CGMS-47, WGII: Satellite Data and Products, CGMS agency reports on highlights issues in dataset and product generation. <http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47> (Доступ свободный).
 13. *Zubkova K.I., Kurevleva T.G., Grishantseva L.A., Velikoselskaya D.M.* Intercalibration of MSU-IK-SRM/Kanopus-V-IK with IASI/Metop // Materials from GSICS-EP-20, Russian Federation, Sochi, 2019 // GSICS-EP-20. https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/GSICS-EP-20/documents/GSICS-EP-20_Doc_5.11p_ROSCOSMOS.pdf (Доступ свободный).