

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ «ПЛАНЕТА»

На правах рукописи

Киселева Юлия Викторовна

ИНТЕРКАЛИБРОВКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ
РАДИОМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГАЗОВЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ

25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д. физ.- мат. наук, ст. науч. сотр.

А. Н. Рублёв

Москва — 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕРКАЛИБРОВКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ	10
1.1 Глобальная система взаимных калибровок	10
1.2 Назначение и характеристика ИК приборов отечественных КА	17
1.3 Российская система валидационных подспутниковых наблюдений СВПН-ГМ	24
ГЛАВА 2 ИНТЕРКАЛИБРОВКА ИНФРАКРАСНОЙ АППАРАТУРЫ ПОЛЯРНО-ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	29
2.1 Оценка влияния спектрально-аппаратных функций ИК каналов радиометров на вычисление яркостных температур на основе моделирования спутниковых измерений.....	29
2.2 Моделирование измерений над морской поверхностью в ИК каналах в условиях разорванной облачности	32
2.3 Методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР	35
2.4 Интеркалибровка фурье-спектрометра ИКФС-2	42
ГЛАВА 3 ИНТЕРКАЛИБРОВКА ИНФРАКРАСНЫХ КАНАЛОВ РАДИОМЕТРА МСУ-ГС	47
3.1 Интеркалибровка МСУ-ГС/Электро-Л №1 по данным зондировщика AIRS	47
3.2 Методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-ГС КА Электро-Л №2 по данным радиометров других геостационарных спутников .	56
3.3 Способ оценки реального пространственного разрешения ИК каналов радиометра МСУ-ГС.....	68
3.4 Оценка полноты решения тематических задач МСУ-ГС КА серии Электро-Л.....	74
ГЛАВА 4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИК АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ.....	82
4.1 Оценка совмещения инфракрасных каналов спутниковых радиометров.....	82

4.2	Определение общего содержания озона по измерениям инфракрасных каналов геостационарных радиометров	85
4.3	Определение общего содержания диоксида углерода по измерениям ИКФС-2	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....		99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		101

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Результаты спутникового зондирования атмосферы являются основными входными данными для численного прогноза погоды, используются при создании реанализов и моделировании изменений климата, поэтому в течение всего срока активного существования спутниковой целевой аппаратуры (ЦА) на орбите необходимо контролировать достоверность и стабильность получаемых данных. При запуске космического аппарата (КА) и дальнейшей эксплуатации ЦА на результаты измерений могут влиять различные факторы. Выявить эти факторы на Земле и компенсировать их влияние средствами бортовой калибровки часто не представляется возможным. Поэтому необходимо проведение интеркалибровки - проверки по эталонному спутниковому прибору, - непосредственно на орбите.

В 2005 году Всемирной метеорологической организацией совместно с Координационной группой по метеорологическим спутникам (The Coordination Group for Meteorological Satellites – CGMS) инициировано создание системы по мониторингу и улучшению качества измерений метеорологических КА, получившей название «Глобальная космическая система по интеркалибровке (Global Space-based Inter-Calibration System – GSICS)». Россия (Росгидромет), как участник международного обмена спутниковыми данными, должна предоставлять информацию с отечественных метеорологических КА, аттестованную в соответствии с рекомендациями GSICS. Для этих целей в НИЦ «Планета» была создана система валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН), в которой реализованы разработанные в диссертационном исследовании методики интеркалибровки целевой аппаратуры.

В настоящее время российская группировка метеорологических КА состоит из двух полярно-орбитальных КА серии Метеор-М, двух геостационарных КА серии Электро-Л и одного высокоэллиптического КА

серии Арктика-М. КА серии Метеор-М оснащены радиометрами – многозональным сканирующим устройством малого разрешения (МСУ-МР) и инфракрасным фурье-спектрометром ИКФС-2. На КА серии Электро-Л и Арктика-М установлены радиометры – многозональные сканирующие устройства МСУ-ГС. Измерения перечисленной аппаратуры используются для круглосуточного дистанционного определения параметров атмосферы (вертикальные профили температуры и влажности, концентрации малых газовых примесей) и температуры подстилающей поверхности.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью контролировать работоспособность отечественных спутниковых приборов во время летных испытаний и эксплуатации КА на орбите. Кроме того, разработка и совершенствование существующих методик интеркалибровки позволяет обеспечить однородность рядов оценок параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным отечественных радиометров при замене выработавшего свой срок прибора новым, установленном на другом КА, за счет применения существующих апробированных алгоритмов.

Степень разработанности исследования

Разработке методик и алгоритмов интеркалибровки инфракрасных спутниковых приборов посвящено большое количество работ. Общим является сопоставление измерений поверяемого и эталонного приборов над одним или несколькими выбранными районами земного шара. Для обеспечения точности радиометрической калибровки особое внимание обращается на пространственно-временное совмещение измерений, а также учет различий в спектральном и пространственном разрешении сравниваемых приборов.

Этот подход полностью реализован в диссертации. В качестве эталонных автор использовал спутниковые приборы, которые неоднократно применялись членами международной группы GSICS в различных калибровочных кампаниях.

Цель и задачи работы

Целью диссертации является создание методик интеркалибровки ИК каналов бортовой целевой аппаратуры действующих и перспективных

российских метеорологических КА для обеспечения корректного определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методик интеркалибровки ИК каналов приборов на полярно-орбитальных и геостационарных КА.
2. Разработка методик интеркалибровки ИК каналов радиометров российских метеорологических КА.
3. Проведение интеркалибровки ИК фурье-спектрометра ИКФС-2.
4. Разработка методики определения общего содержания озона по данным радиометров, установленных на геостационарных КА.
5. Разработка методики определения общего содержания диоксида углерода по данным фурье-спектрометра ИКФС-2.

Научная новизна

1. Впервые разработана методика интеркалибровки ИК каналов радиометров МСУ-МР российских полярно-орбитальных метеорологических КА серии Метеор-М.
2. Разработана новая методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-ГС геостационарных КА серии Электро-Л с учетом реального пространственного разрешения спутниковых измерений.
3. Создана методика оценки общего содержания озона по данным измерений в ИК каналах радиометров геостационарных КА при наличии облачности в поле зрения прибора.
4. Впервые разработана методика оценки общего содержания диоксида углерода в атмосфере по данным российского фурье-спектрометра ИКФС-2 КА серии Метеор-М.

Практическая значимость работы

1. На основе разработанных методик осуществлена интеркалибровка ИК-каналов радиометров МСУ-МР и МСУ-ГС КА серии Метеор-М и Электро-Л, а также фурье-спектрометра ИКФС-2 в период летных испытаний и эксплуатации.

2. Разработанные методики интеркалибровки внедрены в оперативную работу СВГН НИЦ «Планета».

3. Методика интеркалибровки ИК каналов МСУ-МР реализована в программном обеспечении «Программа интеркалибровки ИК-каналов сканера МСУ-МР космического аппарата «Метеор-М» №2» (свидетельство о государственной регистрации в Роспатенте № 2018615976 от 18.05.2018).

4. Методика интеркалибровки ИКФС-2 реализована в программном обеспечении «Программа интеркалибровки инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 космического аппарата «Метеор-М» №2 (свидетельство о государственной регистрации в Роспатенте № 2018615978 от 18.05.2018).

5. Для определения общего содержания озона по измерениям радиометра МСУ-ГС новых геостационарных и высокоэллиптических КА серий Электро-Л и Арктика-М проведено сужение спектрального диапазона ИК канала вблизи 9,7 мкм.

6. Проведена оценка реального пространственного разрешения ИК каналов радиометра МСУ-ГС.

7. Обеспечен регулярный выпуск карт общего содержания диоксида углерода для территории России по данным фурье-спектрометра ИКФС-2.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР по данным геостационарного радиометра SEVIRI.

2. Методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-ГС по данным радиометра SEVIRI.

3. Способ оценки реального пространственного разрешения ИК каналов радиометра МСУ-ГС.

4. Методика определения общего содержания озона по измерениям ИК каналов геостационарных радиометров.

5. Методика определения общего содержания диоксида углерода по измерениям фурье-спектрометра ИКФС-2.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в постановке и решении задач диссертационного исследования. Им выполнено моделирование измерений спутниковых ИК радиометров, созданы и внедрены в практику НИЦ «Планета» методики интеркалибровки российских спутниковых приборов. Автором разработана методика и соответствующее программное обеспечение определения общего содержания озона по данным радиометров геостационарных КА. При непосредственном участии автора разработана методика определения общего содержания диоксида углерода по данным отечественного фурье-спектрометра ИКФС-2.

Достоверность разработанных методик интеркалибровки, способов определения общего содержания озона и диоксида углерода подтверждается подробным анализом условий измерений, учетом специфики устройства и режимов работы поверяемых и эталонных приборов, обоснованным сочетанием использования модельных и натурных данных, валидацией результатов по независимым источникам и их публикацией в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, а также в Интернете.

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах НИЦ «Планета», ФГБУ «Гидрометцентр России», Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН и других научных организациях России, ежегодных заседаниях международной рабочей группы GSICS, различных международных и российских научно-технических конференциях: 16-ая международная конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», ИФА РАН, 2012 г., 2015 г.; International ZOTTO workshop on «The response of Northern Eurasian ecosystems to global climate change: from observations to forecasting», ИЛ СО РАН, г. Красноярск, 2013 г.; Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике «МСАРД», г. Санкт-Петербург, 2013 г., 2015 г., 2021 г.; Всероссийская открытая ежегодная конференция

«Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», ИКИ РАН, Москва, 2014 г., 2019 г.; Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики», г. Апатиты, 2016 г.; Восьмая Азиатско-Тихоокеанская конференция пользователей данных метеорологических и других спутников наблюдения Земли (AOMSUC-8), Владивосток, 2017 г.; Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», Москва, ВНИИЭМ в 2020 г. и 2021 г.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных работах, 3 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus, 4 - в журналах, рекомендованных ВАК, 6 - в материалах международных и российских конференций. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации интеллектуальной собственности (программы для ЭВМ). Результаты интеркалибровки ИК приборов российских КА доступны на сайте <http://planet.rssi.ru/calval/>. Интерактивная карта общего содержания диоксида углерода в атмосфере над Россией и прилегающих территориях доступна на сайте <http://onir.rcpod.space/>.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕРКАЛИБРОВКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ

1.1 Глобальная система взаимных калибровок

Одним из элементов Всемирной службы погоды является Глобальная система наблюдений (Global Observing System, GOS). GOS обеспечивает получение данных наблюдений с Земли и из космоса. Ее космическая подсистема состоит из полярно-орбитальных, геостационарных, высокоэллиптических гидрометеорологических КА, КА для исследования окружающей среды и наземных центров приема, обработки, архивирования и передачи спутниковых данных. Взаимодействие между операторами КА и Всемирной метеорологической организацией (ВМО) осуществляется в рамках Координационной группы по метеорологическим спутникам (Coordination Group for Meteorological Satellites, CGMS) [1, 2].

В ноябре 2005 г. под эгидой ВМО и CGMS на 33-й встрече CGMS создана Глобальная космическая система интеркалибровки – Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS). На этой встрече разработана концепция и сформулированы основные положения программы.

Основным направлением деятельности GSICS является обеспечение достоверности и точности спутниковых данных для мониторинга изменений климата, прогнозирования погоды и экологических задач путем отслеживания работы аппаратуры, осуществления привязки спутниковых измерений к физическим шкалам и системе СИ, проведения оперативной интеркалибровки приборов и калибровки архивных измерений. GSICS предоставляет итоговые калибровочные коэффициенты для ассимиляции данных систем наблюдения, способствует ассимиляции спутниковых данных в Интегрированную глобальную систему наблюдений ВМО (ИГСН ВМО), глобальную систему наблюдения за Землей (GEOSS) группы наблюдения за Землей (GEO).

Содействие GSICS оказывают космические и метеорологические агентства Евросоюза, Индии, Канады, Китая, России, США, Южной Кореи, Японии [3].

Аппаратура, стабильность радиометрических характеристик которой сохраняется при длительной эксплуатации и постоянно проверяется на точность и достоверность, выбирается в качестве эталонной. Методика интеркалибровки ИК-каналов приборов заключается в пространственно-временном и спектральном совмещении данных эталона и тестируемого приборов. В итоге измерения Y тестируемого прибора должны соответствовать эталонным X с коэффициентами a и b простого линейного уравнения [4]:

$$Y(X) = a + b * X \quad (1.1)$$

Максимальная согласованность в интеркалибровке различных спутниковых приборов разными рабочими группами достигается тем, что алгоритмы интеркалибровки разрабатываются с соблюдением рекомендаций последовательности выполнения этапов: 1) выделение наборов данных; 2) пространственно-временное совмещение; 3) преобразование данных; 4) фильтрация; 5) мониторинг; 6) коррекция [5].

По решению исполнительной комиссии GSICS первой была осуществлена интеркалибровка ИК каналов радиометра Imager американского геостационарного КА GOES. В качестве эталонных инструментов использовались гиперспектральный зондировщик AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) и инфракрасный интерферометр IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), установленные на полярно-орбитальных КА. Они были выбраны из-за высокой точности калибровки, почти полного спектрального покрытия каналов широких каналов Imager и наличия совмещения измерений с ним в средних и низких широтах. AIRS также был выбран в качестве эталона для интеркалибровки ИК каналов радиометров, установленных на китайском и японском геостационарных КА [6].

В настоящее время GSICS рекомендует [7] использовать в качестве эталонов для интеркалибровки инфракрасной аппаратуры интерферометр

IASI, установленный на борту КА Metop-B, инфракрасный зондировщик CrIS (Cross-track Infrared Sounder) КА Suomi NPP и NOAA-20. Выбор эталонов обусловлен анализом стабильности работы приборов, его спектральным охватом/разрешением, бюджетом ошибок (определением характеристик перед запуском и проверкой после запуска КА), точностью географической привязки и доступностью данных.

В рамках GSICS [5] проводятся следующие виды интеркалибровок: Geo-Leo (или Leo-Geo) – измерения приборов геостационарных КА (Geo) приводятся в соответствие данным приборов полярно-орбитальных КА (Leo) или наоборот; Geo-Geo – измерения приборов соседних геостационарных КА приводятся в соответствие друг другу; Leo-Leo – друг с другом сопоставляются измерения приборов, установленные на полярно-орбитальных КА.

В [8] описана методика использования IASI в качестве референсного инструмента и результаты интеркалибровки различных геостационарных радиометров (схема Geo-Leo), в том числе радиометра SEVIRI, установленного на европейских геостационарных КА серии Meteosat. Авторами [9] подробно описана методика интеркалибровки SEVIRI, который будет использован в качестве одного из эталонных приборов для интеркалибровки российских радиометров.

Радиометр SEVIRI имеет 8 каналов в диапазоне от 3,9 до 13,4 мкм с пространственным разрешением ИК каналов в надире 3 км [10]. IASI содержит 8 461 канал со спектральным разрешением $0,25 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне от 3,62 до 15,50 мкм, пространственное разрешение пикселя в надире – 12 км [11]. Выделение набора данных происходит следующим образом. Поле обзора SEVIRI ограничено $\pm 52^\circ$ по широте/долготе от подспутниковой точки (0° в.д., с.ш.). Все измерения IASI с каждого пролета собираются в этом районе в течение суток. Затем из этих данных формируется подмножество, отбираемое по временному совмещению с данными SEVIRI. Пространственно-временное совмещение реализуется в несколько шагов. Вначале из подмножества ранее

отобранных пикселей извлекаются центральные для каждого радиометра. Совмещенными считаются те, расстояние между которыми меньше заранее заданного порогового значения. В качестве порогового значения принимается номинальный радиус пикселя IASI в надире. Для пикселей SEVIRI создана специальная таблица, которая идентифицирует ближайшие к пикселю IASI. Разница в измерениях пикселей по времени не должна превышать 300 сек. Затем выбранные пиксели проверяются на углы визирования – наблюдаемая атмосферная трасса должна быть одинаковой. Это определяется соотношением косинусов зенитных углов:

$$|\cos Geo_ZA / \cos(Leo_ZA) - 1| < 0,01, \quad (1.2)$$

где Geo_ZA – зенитный угол визирования из пикселя на геостационарный КА, Leo_ZA – зенитный угол визирования из пикселя на полярно-орбитальный КА.

Отобранные пиксели, как изображено на рисунке 1.1.а), распределяются примерно симметрично относительно экватора и образуют характерный наклонный рисунок в форме песочных часов. На рисунке 1.1 б) показаны каналы SEVIRI (3.9, 6.2, 7.3, 8.7, 9.7, 10.8, 12.0, 13.4 мкм), участвующие в интеркалибровке, и их пересечение с каналами IASI.

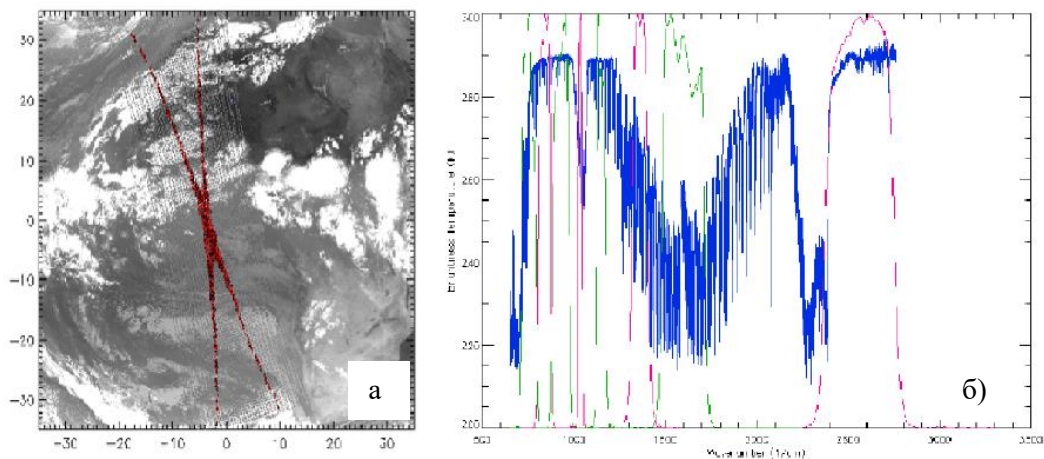


Рисунок 1.1 - Совмещение измерений для проведения интеркалибровки: а) пространственно-временное, б) спектральное [8].

Спектрально-аппаратные функции каналов SEVIRI интерполируются на спектральную сетку IASI в пространстве волновых чисел. Интенсивность излучения, отсутствующая в IASI для канала SEVIRI 3,9 мкм, оценивается в

соответствии с подходом [12] с использованием модельных расчетов интенсивностей излучения для разных моделей атмосферы и программы LBLRTM. Затем спектральные интенсивности в каналах IASI сворачиваются со спектрально-аппаратными функциями радиометра SEVIRI:

$$Rad_{sim} = \frac{\int_{\nu} Rad_{\nu} SRF_{sev} d\nu}{\int_{\nu} SRF_{sev} d\nu}, \quad (1.3)$$

где SRF – Spectral Response Function – спектрально-аппаратная функция каналов SEVIRI, Rad_{ν} – интенсивность излучения в каналах IASI (мВт/м²/стер./см⁻¹). Один пиксель IASI замещается массивом 5x5 пикселей SEVIRI. Дополнительно создается массив 9x9 пикселей SEVIRI, чтобы оценить однородность сцены первого массива. Затем рассчитываются значения интенсивностей для каждого канала с использованием модели переноса излучения RTTOV на основе стандартного профиля атмосферы и состояния поверхности, находится уравнение регрессии эталонных и проверяемых интенсивностей. Для получения регрессий используются ночные измерения, когда нет вклада отраженного солнечного излучения [9].

Интеркалибровка по схеме Leo-Leo имеет два разных подхода. Один из них заключается в сравнении измерений в надир двух зондировщиков при пересечении их траекторий полетов в высоких широтах – Simultaneous Nadir Overpasses (SNO). При совмещении данных строго отслеживается соблюдение критериев отбора данных. Для пикселей CrIS и IASI [13] разница по времени измерений составляет не более 2-х минут, по расстоянию – не более 6,5 км. Зенитные углы наблюдения КА из пикселей должны были быть близкими, а сами пиксели – либо полностью безоблачными, либо покрыты сплошной облачностью.

Второй подход – Double Differencing Technique или «метод двойных разностей» (МДР) – косвенно сравнивает измерения двух приборов через третий геостационарный радиометр. Для AIRS и IASI с использованием расчета переноса излучения, основанного на полях анализа численного прогноза погоды, определяется яркостная температура над поверхностью океана в дневное время. При этом измерения в каналах AIRS и IASI

свертываются со спектрально-аппаратной функцией соответствующих каналов GOES Imager:

$$R = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} R(\nu)S(\nu)d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu)d\nu}, \quad (1.4)$$

где $R(\nu)$ – интенсивность излучения IASI на каждой длине волны ν , $S(\nu)$ – спектрально-аппаратная функция GOES Imager, ν_1, ν_2 – границы его каналов. Суть методики МДР заключается в наборе рядов разностей:

$$\Delta BT = mean(BT_{GOES} - BT_{AIRS}) - mean(BT_{GOES} - BT_{IASI}), \quad (1.5)$$

где $mean$ – средние значения измерений за день. Отметим, что сравнение проводится только для дневного времени суток, когда однородность наблюдаемых атмосферных сцен легко контролируется визуально. Преимущество МДР состоит в том, что можно формировать двойные разности для разных географических районов и различных временных периодов, используя разные геостационарные радиометры со стабильной калибровкой. Недостаток такого подхода заключается в том, что интеркалибровка возможна только в диапазонах каналов геостационарных радиометров, а полные спектры AIRS и IASI проверить на соответствие не удастся [14].

Для интеркалибровки отечественных радиометров МСУ-ГС, устанавливаемых на геостационарные КА серии Электро-Л, использована схема Geo-Geo, т.е. в качестве эталонных измерений привлекаются данные соседних геостационарных радиометров. Помимо радиометра SEVIRI это измерения радиометров AMI (Advanced Meteorological Imager) корейского КА GeoKompsat-2A (запущен в 2018 г. в точку 128,2° в. д.) и ANI (Advanced Himawari Imager) японского КА Himawari-8 (запущен в 2015 году в точку 140,7° в. д.). В [15] описана методика интеркалибровки по схеме Geo-Geo геостационарных радиометров AMI и ANI. Радиометры AMI и ANI имеют 10 ИК каналов в диапазоне от 3,5 до 13,4 мкм с линейным размером пикселя 2 км.

Преимущество схемы интеркалибровки геостационарных приборов между собой состоит в том, что можно отследить суточный ход калибровочных зависимостей, в отличие от интеркалибровки с полярно-орбитальным КА

(Geo-Leo), когда низкоорбитальный КА пролетает в подспутниковой точке геостационарного КА только два раза в сутки. Схема Geo-Geo удобна еще и тем, что Himawari-8 и GeoKompsat-2A находятся на расстоянии всего $12,5^\circ$ по долготе, что дает большой район пересечений полей зрения приборов. Авторами [15] проводилось совмещение пикселей радиометров с разностями зенитных углов менее 0,5%, что соответствует длинной узкой полосе между радиометрами. Возможное влияние параллакса высоких облаков убирается с помощью пороговой методики: если стандартное отклонение яркостных температур (ЯТ) в матрице размером 3×3 пикселя и окружающей области 5×5 пикселей с тем же центром превышала 1К, то такие пиксели отсеивались. В полученной выборке сравнивалась усредненная интенсивность излучения в области 3×3 пикселя и пересчитывалась в термины ЯТ.

На рисунке 1.2 показан суточный ход для всех каналов радиометра АМІ, который удалось выявить благодаря 10-минутным наблюдениям сканирования в течение января 2020 года. Серая вертикальная линия – это местная полночь. В это время КА находятся на линии Солнце-Земля-Спутник и солнечный свет напрямую попадает на поверхность приборов. Этот дополнительный нагрев влияет на калибровочные коэффициенты несмотря на наличие системы охлаждения [15].

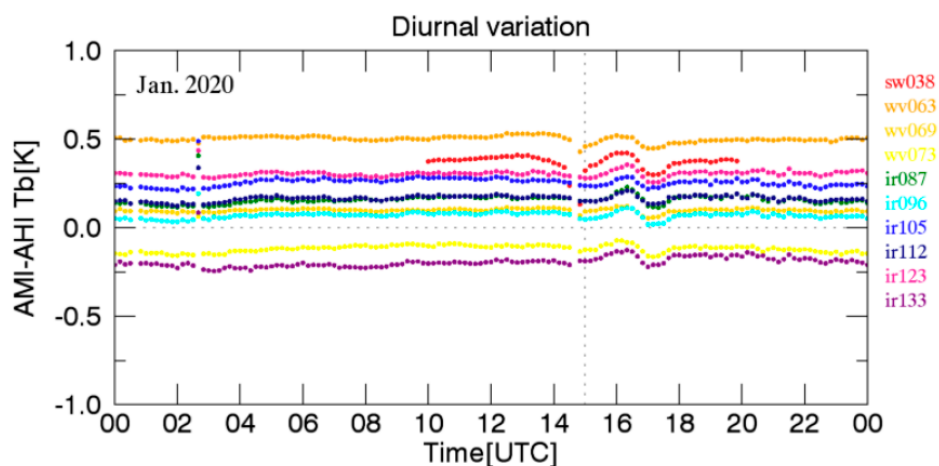


Рисунок 1.12 - Суточный ход внешней калибровки [15]

Таким образом, рассмотренные основные схемы интеркалибровки, используемые в GSICS, частично, в силу особенностей работы отечественной аппаратуры, могут быть применены к приборам, устанавливаемым на КА серии Метеор-М и Электро-Л. В качестве эталонных приборов могут быть использованы радиометры на геостационарных КА серии Meteosat, Himawari и GeoKompSat, так как они регулярно участвуют в интеркалибровочных кампаниях и имеют стабильные радиометрические характеристики, а также высокую точность измерений.

1.2 Назначение и характеристика ИК приборов отечественных КА

Инфракрасная метеорологическая аппаратура на российских КА представлена многозональными радиометрами и фурье-спектрометрами. Фотоприемные устройства этих приборов сделаны из сплава HgCdTe (ртуть-кадмий-теллур) и требуют охлаждения при эксплуатации на орбите до 78К, чтобы уменьшить дробовой шум, обусловленный тепловой генерацией зарядов [16].

Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2, устанавливаемый на полярно-орбитальных КА серии Метеор-М, предназначен для определения вертикальных профилей температуры и влажности, общего содержания углекислого газа, температуры подстилающей поверхности, общего содержания малых газовых составляющих (метан, азот и др.) [17, 18]. Спектральный диапазон прибора от 5 до 15 мкм, количество каналов – 2700, номинальное спектральное разрешение – $0,3 \text{ см}^{-1}$, поле зрения в надир – 1 пиксель $35 \times 35 \text{ км}^2$ [19]. ИКФС-2 имеет четыре режима съемки с шириной полосы от 1 000 км до 2 500 км и соответствующим шагом пространственной сетки от 60 до 110 км. Требования к величине радиометрического шума задается в терминах пороговой спектральной яркости NESR (v) и составляет от 0,15 до 0,45 мВт/(м²·ср·см⁻¹) [20]. Фурье-спектрометр ИКФС-2 по своим

характеристикам близок к аналогичным зарубежным приборам: европейскому IASI и американскому CrIS [11].

На рисунке 1.3 представлено изображение прибора ИКФС-2 (слева) и его суточное покрытие съемкой подстилающей поверхности в режиме полосы обзора 1 000 км (справа).

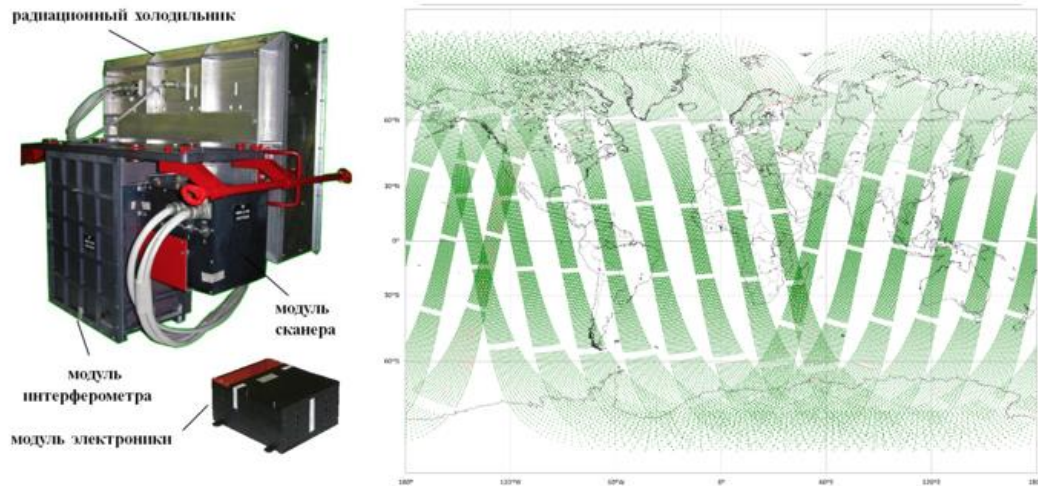


Рисунок 1.3 – ИКФС-2 (слева) и его полоса обзора в 1 000 км (справа) [19]

Модуль интерферометра ИКФС-2 построен по схеме Майкельсона с уголковыми отражателями вместо зеркал. Интерферограмма входного излучения представляет собой зависимость регистрируемого фотоприемниками сигнала от оптической разности хода. Для оцифровки интерферограммы используется референтный канал – излучение лазера с $\lambda_{\text{реф}}=1,31 \text{ мкм}$ [20].

При наземной радиометрической калибровке собственное излучение прибора регистрируется по наблюдениям «холодного» черного тела - стенки, заохоложенной азотом до 80К. Объектом наблюдения выступает эталонное абсолютно черное тело с коэффициентом поглощения больше 0,996, температура которого изменяется в диапазоне от 250 до 325К [21]. Бортовая калибровка заключается в измерении интерферограмм и вычислении спектров излучения «горячего» черного тела и «холодного» ($\sim 4\text{К}$) космоса, при этом температура черного тела поддерживается постоянно на уровне $33,5\pm 0,2^\circ\text{C}$, а степень черноты больше 0,995 [19].

Работа [22] посвящена определению ковариационной матрицы шума в измерениях ИКФС-2, знание которой необходимо для правильной интерпретации данных измерений ИКФС-2 и их эффективного усвоения в схемах численного прогноза погоды. В статьях [23] исследуется использование ИКФС-2 в численном прогнозе погоды. В [24, 25] анализируются возможности применения измерений ИКФС-2 для мониторинга общего содержания озона.

Аппаратура МСУ-МР, устанавливаемая на полярно-орбитальных КА серии Метеор-М, предназначена для получения информации об облачном покрове и его характеристиках в региональном масштабе, оценки температуры поверхности океана (ТПО) и суши (ТПС). Средняя высота орбиты – 832 км. МСУ-МР проводит измерения в трех видимых (от 0,50 до 0,70 мкм, от 0,70 до 1,10 мкм, от 1,60 до 1,80 мкм) и трех инфракрасных (от 3,50 до 4,10 мкм, от 10,5 до 11,5 мкм, от 11,5 до 12,5 мкм) диапазонах спектра, полоса обзора составляет 2 900 км, линейный размер пикселя в надире – 1 км [26]. На рисунке 1.4 показано изображение аппаратуры МСУ-МР (слева) и пример тематической продукции (монтаж изображения облачности), создаваемой в НИЦ «Планета» (справа). Диапазон измеряемых радиационных температур в ИК каналах 5 и 6: от 220 до 320К (КА Метеор-М №2), от 190 до 320К (КА Метеор-М № 2-2), эквивалентная шуму разность температур в каналах на уровне 300К – 0,06 и 0,07К соответственно [27].

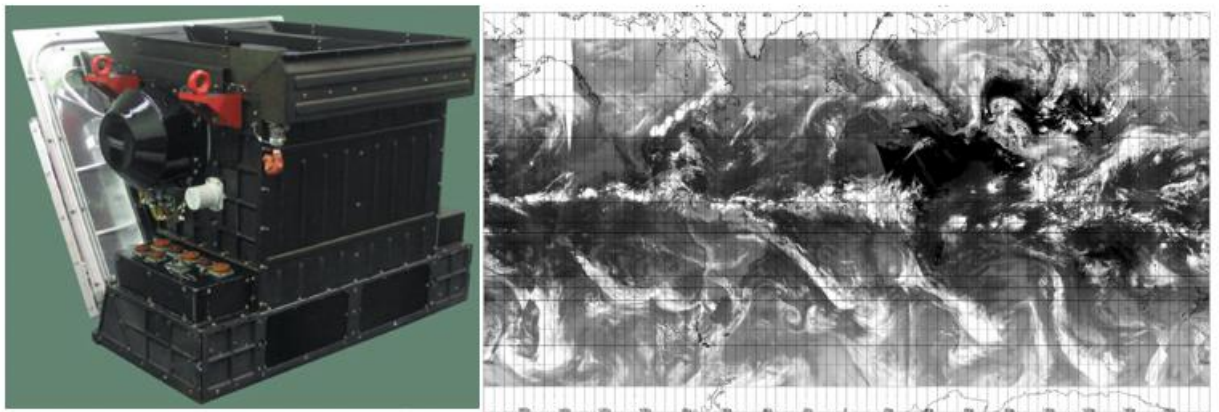


Рисунок 1.4 – Многозональное сканирующее устройство малого разрешения – МСУ-МР (слева) [26], изображение облачности в его 5-м канале (справа)

Оптико-механическая система МСУ-МР КА Метеор-М № 2 состоит из плоского сканирующего зеркала на приводе, совершающего непрерывное круговое вращение, шести оптических блоков, формирующих изображения в шести спектральных диапазонах и соответствующих им шести блоков радиометрической калибровки. Оптические блоки ИК-диапазона (от 3,5 до 12,5 мкм) включают в себя поворотные зеркала, объектив, фильтр, формирующий изображение, и приемник излучения из 4-х элементов размером 0,05х0,08 мм, ориентированных вдоль луча сканирования. Изображение точки поверхности проецируется последовательно на фотоприемник, а затем 4 накопленных сигнала усредняются и формируется итоговый отсчет [28].

На этапе наземной калибровки получают однозначные характеристики преобразования выходного сигнала МСУ в зависимости от радиационной температуры объекта наблюдения с использованием опорных имитаторов абсолютно черного тела (ИАЧТ). Выходной цифровой сигнал формируется по алгоритму:

$$S'(T) = \frac{S(T) - S_{хол}(T_{ИАЧТхол})}{S_{гор}(T_{ИАЧТгор}) - S_{хол}(T_{ИАЧТхол})} \cdot (S_{гор} - S_{хол}) + S_{хол}, \quad (1.6)$$

где $S_{гор}, S_{хол}$ – заданное значение нормализованного сигнала при температуре объекта $T = T_{ИАЧТгор}$ и $T = T_{ИАЧТхол}$ соответственно [28].

Преобразование цифрового сигнала в термины радиационной температуры происходит на этапе радиометрической калибровки с помощью табличных значений зависимости сигнала от температуры образцового теплового излучателя. На прибор подается поток излучения от теплового излучателя в диапазоне от 250 до 313К с шагом 10К и для каждого значения температуры он пересчитывается в эквивалентную температуру абсолютно черного тела (АЧТ), так как образцовый излучатель является серым телом $T_{экв} = T(R_{экв})$. Неопределенность коэффициента излучения «серого» образцового излучателя не сильно влияет на расчет фоновой составляющую потока излучения ($T_{фон}$ на борту составляет около 300К), но при удалении от этого уровня роль его

возрастает. Например, для диапазона от 3,5 до 4,1 мкм на уровне 213К погрешность в определении $T_{\text{эв}}$ может составлять 26К, а на уровне 313К – 0,3К, в диапазоне от 10,5 до 11,5 мкм соответственно 3К и 0,3К [28].

Радиометры МСУ-ГС, устанавливаемые на геостационарные КА серии Электро-Л, обеспечивают получение изображений всего наблюдаемого диска Земли в трех видимых (от 0,5 до 0,65 мкм, от 0,65 до 0,80 мкм, от 0,80 до 0,90 мкм) и семи инфракрасных (от 3,5 до 4,0 мкм, от 5,7 до 7,0 мкм, от 7,5 до 8,5 мкм, от 8,2 до 9,2, от 9,2 до 10,2 мкм, от 10,2 до 11,2 мкм, от 11,2 до 12,5 мкм) каналах. На рисунке 1.5 приведены спектральные аппаратные функции ИК каналов радиометра МСУ-ГС (каналы от №7 до №10) и аналогичного европейского радиометра SEVIRI (каналы 8.7, 9.7, 10.8 и 12.0 мкм).

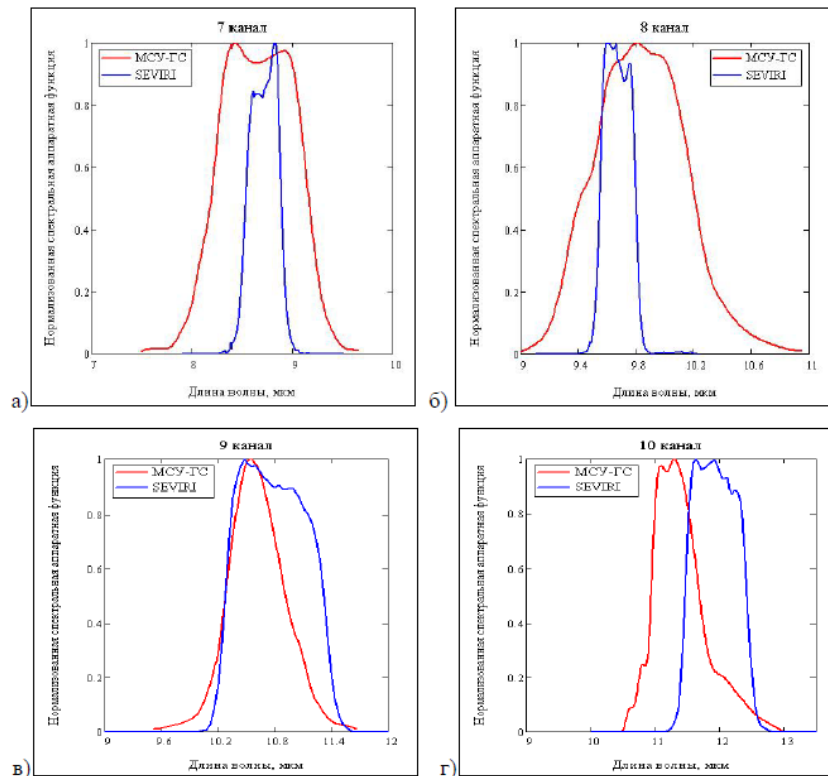


Рисунок 1.5 – Спектральные аппаратные функции ИК каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №1 и SEVIRI КА Meteosat-10

По данным измерений МСУ-ГС создаются карты облачности, определяются векторы ветра, оценивается температуры поверхности океана и др. Один виток на геостационарной орбите (высота 36 000 км) спутник совершает за одни сутки, то есть он постоянно находится над заданной точкой

земной поверхности и снимает видимый диск Земли с периодичностью 30 (15 в учащенном режиме) минут [29].

На рисунке 1.6 показано изображение радиометра МСУ-ГС (слева) и пример тематической спутниковой продукции (вектора ветра), создаваемой в НИЦ «Планета» (слева).

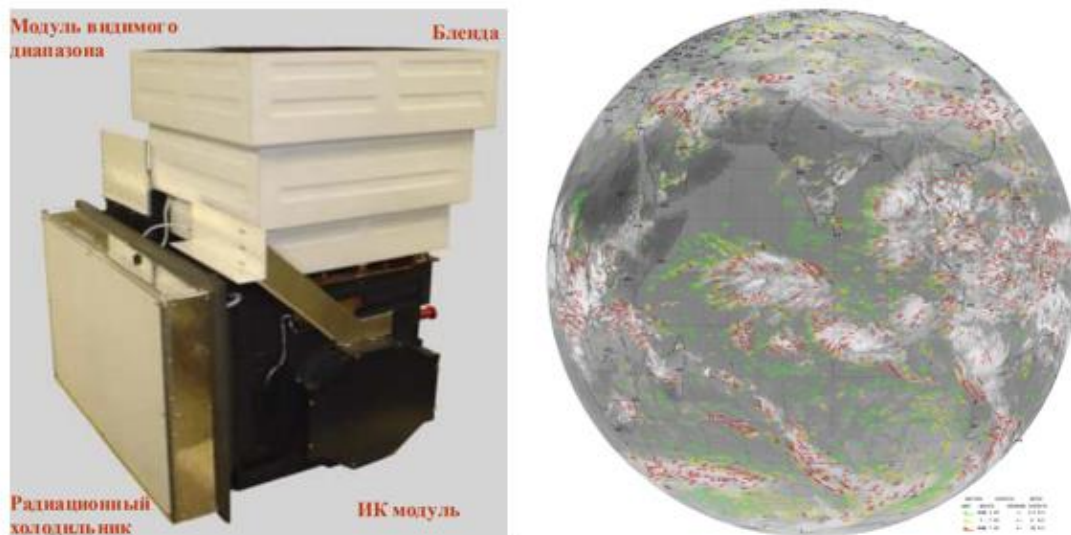


Рисунок 1.6 – Многозональное сканирующее устройство геостационарное – МСУ-ГС (слева) [29] и карта векторов ветра, полученная по данным в ИК каналах МСУ-ГС (справа)

Изображение в ИК каналах МСУ-ГС формируется с помощью сканирующего двухкоординатного зеркала и многоэлементных фотоприемников (288x4 элемента). Сканирующее зеркало плавно поворачивается в направлении восток-запад, перпендикулярном ориентации линеек фотоприемника, и дискретно в направлении, параллельном ориентации линеек, получая 288 строк в одном скане. Таким образом за 35 сканов, с нахлестом соседних сканов друг на друга, формируется изображение диска Земли [30,32,31].

Наземная калибровка МСУ-ГС осуществляется на измерительном комплексе «Камелия». Диапазон температур калибровки – от 253К (-20 °С) до 338К (+65 °С) с шагом 2К. Нижняя граница диапазона калибровки не охватывает естественных условий в атмосфере, например, температура мощных кучевых облаков в тропической зоне может достигать 190К, что

необходимо учитывать при проведении интеркалибровочных работ на орбите. При наземной калибровке используются два опорных источника сигнала: один от ИАЧТ с температурой близкой к 340К, другой – от низкотемпературного ИАЧТ, примерно в диапазоне от 90 до 95К. По результатам калибровки для ИК каналов строится таблица зависимости выходного сигнала от радиационной температуры в диапазоне от 220 до 340К [33].

Во время полета температура оптической системы МСУ-ГС поддерживается в диапазоне от +5 ° до +35 °С. Устранение собственного излучения $S_{МСУ}$ оптической системы МСУ-ГС и, таким образом, выделение «чистого» сигнала S наблюдаемой земной сцены из суммарного сигнала S_{Σ} происходит вычитанием:

$$S = S_{\Sigma} - S_{МСУ}, \quad (1.7)$$

Так как яркостная температура космоса $ЯТ \approx 4К$ и его ИК излучение пренебрежимо мало, по сравнению с собственным излучением оптической системы, то $S_{МСУ}$ измеряется в крайних положениях мгновенного поля зрения прибора, когда оно направлено на космос. Для перехода от сигналов ИК излучения, выраженных в отсчетах прибора или уровнях квантования, к абсолютным значениям интенсивности R оптического излучения, выраженным в международной системе СИ, в начале каждого сеанса измерений проводится краткосрочное ($\sim 0,1$ с) наблюдение бортового имитатора абсолютно черного тела (АЧТ) с интенсивностью $R_{АЧТ}$ [30]. Абсолютная величина $R_{АЧТ}$ по закону Планка определяется температурой $T_{АЧТ}$, которая измеряется с погрешностью не более 0,1К и обычно совпадает с внутренней температурой прибора. Тогда измеренное значение интенсивности R для конкретного наблюдаемого пикселя земной поверхности

$$R = \frac{S_{\Sigma} - S_{МСУ}}{S_{АЧТ} - S_{МСУ}} \cdot R_{АЧТ} \quad (1.8)$$

или

$$S = \frac{S_{АЧТ} - S_{МСУ}}{R_{АЧТ}} \cdot R,$$

где $S_{АЧТ}$ – сигнал от имитатора АЧТ, выраженный в приборных отсчетах.

Линейность амплитудной функции, характеризующей зависимость между интенсивностью R излучения, попадающего на вход светоприемного устройства, и сигналом S на выходе каналов МСУ-ГС, достигалась введением соответствующих поправок, полученных во время предполетной градуировки радиометра по специальному внешнему эталону АЧТ. При градуировке температура эталона менялась с шагом в $2\div 3\text{K}$ в диапазоне от 220 до 340K [34].

1.3 Российская система валидационных подспутниковых наблюдений СВПН-ГМ

В НИЦ «Планета» в 2016 году в рамках Федеральной космической программы 2016 – 2025 создана и успешно функционирует система валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН). Система предназначена для калибровки бортовой целевой аппаратуры КА гидрометеорологического, океанографического и гелиогеофизического назначения и валидации спутниковой информационной продукции. Одной из задач СВПН является анализ соответствия характеристик выходной информационной продукции, получаемой с отечественных КА серий Метеор-М, Электро-Л, Арктика-М требованиям и рекомендациям ВМО. На рисунке 1.7 представлена функциональная схема СВПН.

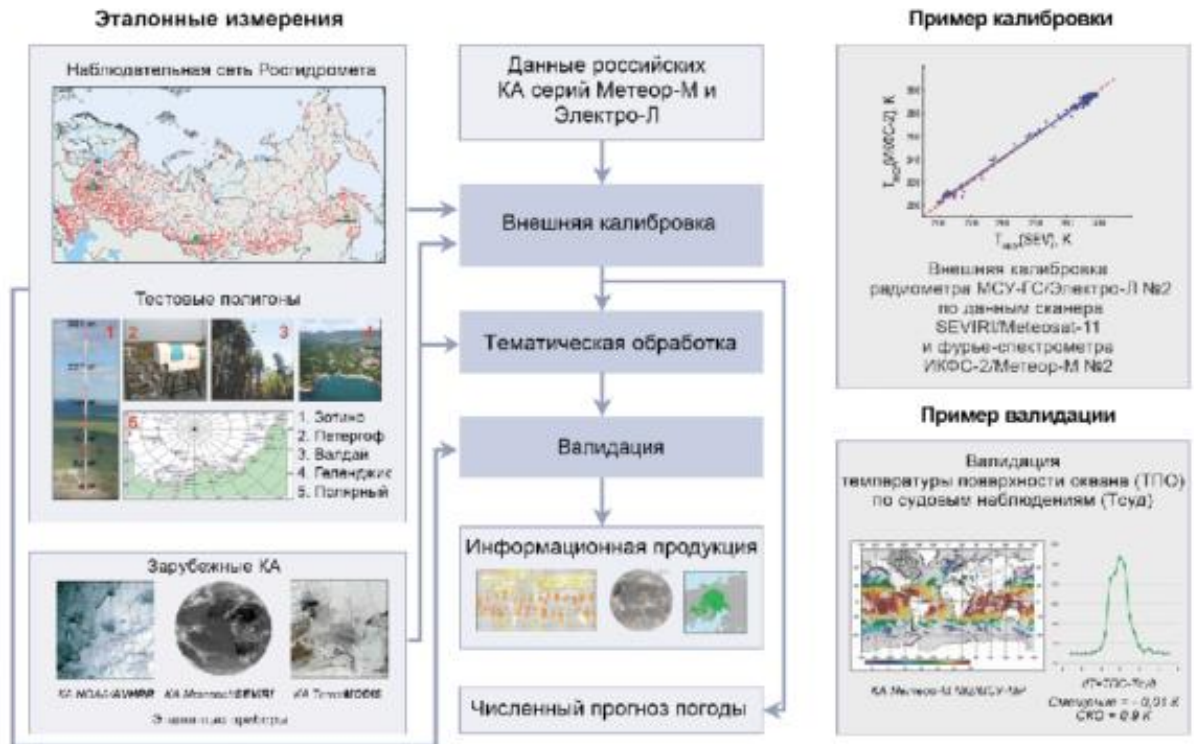


Рисунок 1.7 - Функциональная схема СВПП

СВПП позволяет осуществлять контроль работы аппаратуры на различных этапах ее существования: в период летных испытаний (ЛИ), эксплуатации (долговременный мониторинг) и деградации аппаратуры. В период ЛИ проведение внешней калибровки возможно только после достижения стабильности работы прибора на борту, так как любое изменение в радиометрических характеристиках аппаратуры повлечет за собой нарушение однородности ряда наблюдений.

Архив наземных эталонных данных включает в себя:

- фактические наблюдения наземных метеорологических, гидрологических и аэрологических станций России и сети ВМО, доступ к которым организован ФГБУ «Гидрометцентр России»;
- данные о высоте нижней границы облачности и водности облаков по измерениям микроволнового радиометра RPG NATPRO и лидара CH-15k; вертикальные профили температуры и водяного пара в тропосфере по данным измерений, данные измерений газоанализатора парниковых газов GGA-24r-ER, данные об аэрозольной оптической толщине, общем содержании озона,

водяного пара, метана, оксида азота (O_3 , H_2O , CH_4 , N_2O) по измерениям спектрального комплекса на базе ИК фурье-спектрометра на тестовом полигоне «Воейково-Петергоф»;

- измерения общего содержания озона, метана и угарного газа на научной обсерватории ZOTTO – мачте высотой 300 м, расположенной в Туруханском районе Красноярского края, – высота мачты позволяет отслеживать потоки следовых газов;

- результаты измерений температуры снежно-ледяного покрова, толщины снега и льда с сети прибрежных и островных станций в морях бассейна Северного Ледовитого океана (тестовый полигон «Полярный»), а также географические координаты текущего положения дрейфующих станций.

Спутниковый архив состоит из измерений зарубежных приборов, регулярно проходящих интеркалибровку по рекомендуемым GSICS эталонам и имеющих стабильные радиометрические характеристики: радиометры IASI, SEVIRI, AVHRR, MODIS, AIRS и др.

Для интеркалибровки отечественной бортовой целевой аппаратуры на КА серии Метеор-М в СВПН разработан перечень тестовых полигонов, спутниковые измерения над которыми записываются на специальный сервер. Полигоны выбираются таким образом, чтобы они содержали измерения сцен с однородной структурой (водная поверхность, песок, растительность и др.) или находились в районе подспутниковой точки эталонных геостационарных зарубежных радиометров. К таким сценам относятся, например, Аравийская пустыня, Курская степь, Антарктида, Гренландия, леса Амазонки и др. Для валидации информационных продуктов по CO_2 архивируются измерения над обсерваторией Мауна-Лоа в Гавайях.

Архив данных спутниковых полигонов доступен для авторизованных пользователей на специально созданном в соответствии с рекомендациями GSICS сайте НИЦ «Планета» по калибровке и валидации <http://planet.rssi.ru/calval/>. В разделе «Данные ИКФС-2» в свободном доступе

находятся данные измерений фурье-спектрометра ИКФС-2. Архитектура сайта позволяет ознакомиться с описанием космических комплексов, режимом работы и характеристиками спутниковой аппаратуры. Его логическая структура приведена на рисунке 1.8.

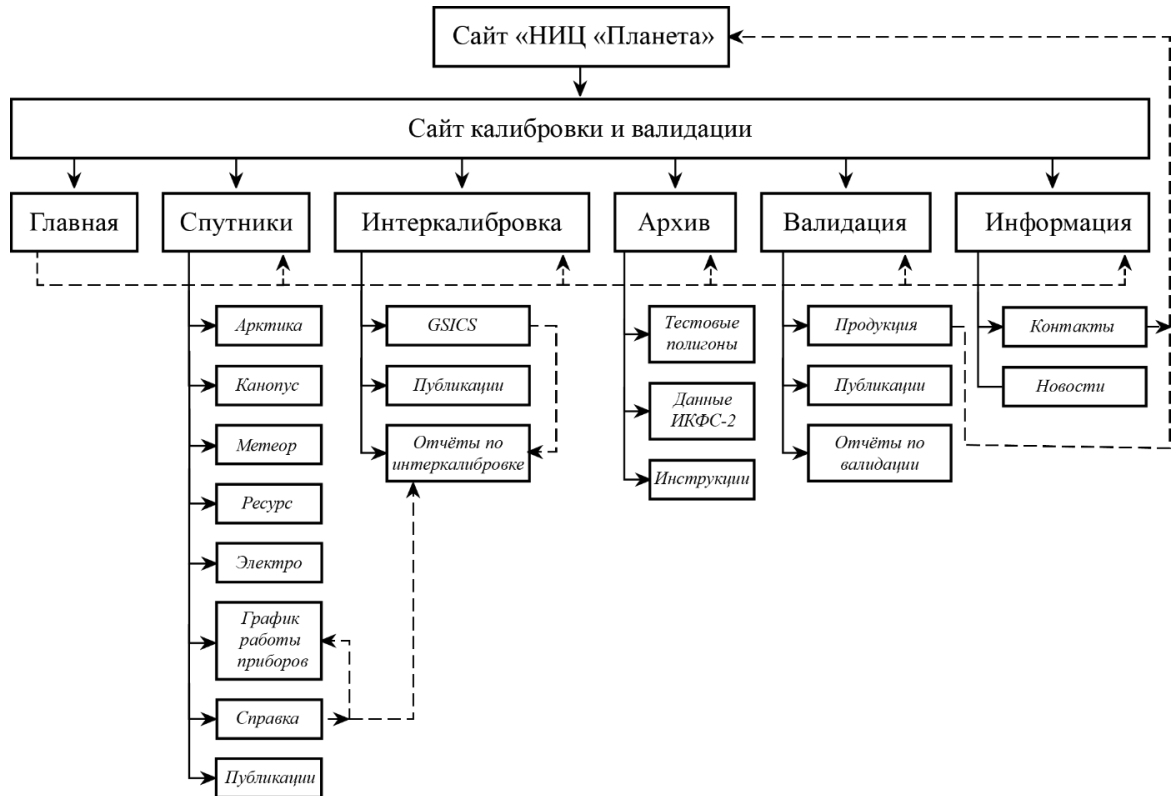


Рисунок 1.8 – Структура сайта калибровки и валидации

На рисунке 1.8 обычным шрифтом приведены блоки сайтов и разделов, курсивом — подразделов; сплошные стрелки указывают строго иерархичную организацию данных, штриховые — дополнительные ссылки между подразделами и на основной сайт НИЦ «Планета».

В настоящее время в рамках СВПН осуществляется интеркалибровка для видимых и ИК каналов радиометров МСУ-МР, микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ и фурье-спектрометра ИКФС-2 на КА серии Метеор-М, видимых и ИК каналов радиометра МСУ-ГС на КА серии Электро-Л. Валидация проводится для следующих продуктов:

- параметры облачности;
- температура поверхности океана;
- вертикальные профили температуры;

- вертикальные профили ветра;
- скорость приводного ветра;
- общее содержание озона в атмосфере;
- общее содержание диоксида углерода;
- параметры снежного покрова;
- границы морского ледяного покрова Арктики.

Результаты работы СВПН регулярно докладываются на заседаниях рабочих групп GSICS, а также публикуются в специальном журнале GSICS Quarterly Newsletters [26, 35, 36, 37].

ГЛАВА 2 ИНТЕРКАЛИБРОВКА ИНФРАКРАСНОЙ АППАРАТУРЫ ПОЛЯРНО-ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

2.1 Оценка влияния спектрально-аппаратных функций ИК каналов радиометров на вычисление яркостных температур на основе моделирования спутниковых измерений

Разработка методики интеркалибровки радиометра МСУ-МР, установленного на российском полярно-орбитальном КА Метеор-М №2, проводилась по данным радиометра SEVIRI геостационарного КА Meteosat-10. SEVIRI регулярно участвует в интеркалибровке с IASI – эталонному прибору, рекомендованному GSICS, – и имеет стабильные характеристики и высокую точность измерений. SEVIRI имеет схожие с МСУ-МР спектральные характеристики ИК каналов. Тем не менее, небольшое различие в спектрально-аппаратных функциях (САФ) каналов эталонного и поверяемого приборов может повлиять на результат вычисления яркостных температур [5]. На рисунке 2.1 показаны САФ 5 и 6 каналов радиометра МСУ-МР КА Метеор-М №2 и аналогичных каналов 10.8 и 12.0 мкм SEVIRI.

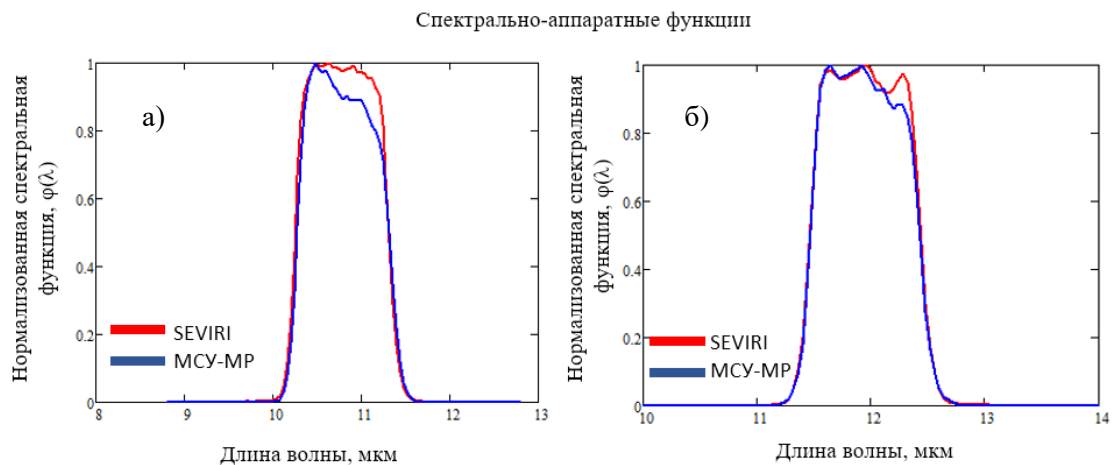


Рисунок 2.1 – Спектрально-аппаратные функции: а) 5 канал МСУ-МР и канал 10.8 мкм SEVIRI, б) 6 канала МСУ-МР и канал 12.0 мкм SEVIRI

Оценка влияния различия САФ на вычисления яркостных температур проведена моделированием спутниковых измерений уходящего излучения в

атмосфере с помощью полинейной модели LBLRTM (Line-by-line Radiative Transfer Module) [38]. Основные преимущества LBLRTM заключаются в следующем:

- использование спектроскопической базы HITRAN для учета молекулярного перехода;
- применение контуров Фойгта для описания формы линии поглощения на всех атмосферных уровнях;
- использование континуумов поглощения водяного пара с учетом самоуширения его линий, углекислого газа и кислорода;
- учет эффектов интерференции линий поглощения углекислого газа в районе от 600 до 800 см^{-1} и 1 932 см^{-1} .

Уходящее излучение вычислено для выбранных девяти [39] наиболее отличающихся по своим параметрам моделей атмосфер М. Матрикарди. Атмосферные профили Матрикарди – это 83 профиля температуры, водяного пара, озона, CO_2 , N_2O , CO и CH_4 (для других газов концентрация постоянная) для 101 уровня давления от 0,05 до 1100 гПа [40]. Спектры излучения, рассчитанные с использованием программы LBLRTM, свернуты с САФ $\varphi(\lambda)$ ИК каналов приборов MCSU-MP и SEVIRI:

$$I_k = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_M \cdot \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

где $N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda$ - нормирующий множитель, R_M - спектр излучения, рассчитанный по LBLRTM, для вертикальных профилей температуры, влажности и концентрации атмосферных газов.

Смоделированные интенсивности излучений I_k в каналах MCSU-MP №5 и №6 и в каналах 10.8 и 12.0 мкм SEVIRI пересчитываются в яркостные температуры по данным калибровочной таблицы, где каждой величине выходного сигнала в ИК канале радиометра ставится в соответствие значение интенсивности излучения абсолютно черного тела. Эта таблица создается при проведении наземной калибровки на стендовом оборудовании с эталонными излучателями для каждого прибора индивидуально.

$$ЯT_{MP} = TP \left(\frac{10^4}{\lambda_{0MR}}, \frac{1}{nm_{MR}} \cdot \int_{NU1}^{NU2} R^*(\nu) \cdot fMR \left(\frac{10^4}{\nu} \right) d\nu \right), \quad (2.2)$$

$$ЯT_{sev} = TP \left(\frac{10^4}{\lambda_{0SEV}}, \frac{1}{nm_{SEV}} \cdot \int_{NU1}^{NU2} R^*(\nu) \cdot fSEV \left(\frac{10^4}{\nu} \right) d\nu \right),$$

где TP – яркостная температура, выраженная из формулы Планка и записанная в виде функции от волнового числа ν см^{-1} :

$$TP(\nu, r) = \frac{c2 \cdot \nu}{\ln(1 + c1 \cdot \frac{\nu^3}{r})}, \quad (2.3)$$

где постоянные $c1 = 0,1191 \cdot 10^{-7}$, $c2 = 1,43868$; λ_{0MR} , λ_{0SEV} – эффективная длина волны каналов радиометров МСУ-МР и SEVIRI соответственно; $\frac{1}{nm_{SEV}}$, $\frac{1}{nm_{MR}}$ – нормализация САФ радиометров; fMR , $fSEV$ – САФ каналов радиометров.

На рисунке 2.2 а) и б) показаны различия в вычисленных ЯТ по моделированию измерений в канале №5 МСУ-МР и 10.8 мкм SEVIRI, полученных с использованием калибровочной таблицы каждого прибора.

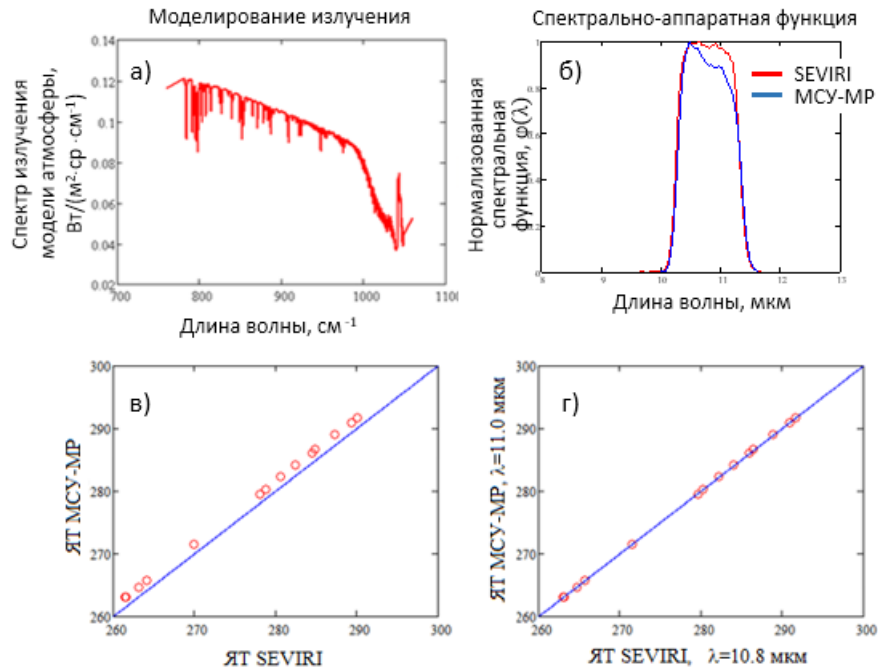


Рисунок 2.2 - Оценка влияния САФ: а) спектр излучения LBLRTM, б) САФ канала 10.8 мкм МСУ-МР и SEVIRI; в) ЯТ, вычисленные с использованием калибровочной таблицы, г) с использованием эффективной длины волны канала

Выбор эффективных длин волн (рисунок 2.2 в, г) при вычислении ЯТ позволяет исключить влияние различия САФ при проведении интеркалибровки.

2.2 Моделирование измерений над морской поверхностью в ИК каналах в условиях разорванной облачности

Для проведения интеркалибровки в области высоких температур используются параллельные измерения ИК каналов поверяемого и эталонного радиометров над океаном вблизи подспутниковой точки геостационарного КА. В безоблачных условиях интеркалибровка трудностей не вызывает, т.к. в условиях горизонтально-однородной атмосферы и океана в качестве подстилающей поверхности смещения в калибровках из-за различий в пространственном разрешении сравниваемых спутниковых радиометров не возникает. В малооблачных условиях, когда есть пригодные для интеркалибровки пиксели с открытой океанской поверхностью, обычно присутствуют кучевые облака [41] с характерными размерами 1-2 км [42]. Некоторые из них могут попасть в поле зрения радиометров и вызвать значительные ошибки в калибровках. Для устранения этих ошибок или существенного уменьшения влияния на точность интеркалибровки в измерениях поверяемого и эталонного приборов при кучевой облачности требуется найти ЯТ, соответствующие средней для безоблачных условий.

Отработка алгоритма интеркалибровки, пригодного для работы в малооблачных условиях, проводилось с привлечением 3D моделирования измерений в каналах спутниковых радиометров. Кучевая облачность задавалась высотой верхней границы облачности $Z(r)$, где $r=\{x,y\}$, представленной в виде конкретной реализации нормального случайного поля, ограниченного снизу на фиксированном уровне H_0 (высоте нижней границы облачности). Полное описание такого моделирования облачности представлено в [43,44]. Реализации $Z(r)$ для различных баллов облачности строились в узлах прямоугольной сетки на площади $100 \times 100 \text{ км}^2$, используя алгоритм [43]. Шаг сетки 0,2 км, что в 5 раз меньше линейного размера пикселя МСУ-МР (1 км) в надире или в 15 раз меньше пикселя SEVIRI (3 км).

Схематично вычисление интенсивности уходящего ИК излучения при наличии кучевых облаков показано на рисунке 2.3, где изображено вертикальное сечение фрагмента облачного поля. Параллельные линии из точек, соответствующих центрам клеток сетки, показывают направление, под которым фрагмент поля наблюдается со спутника.

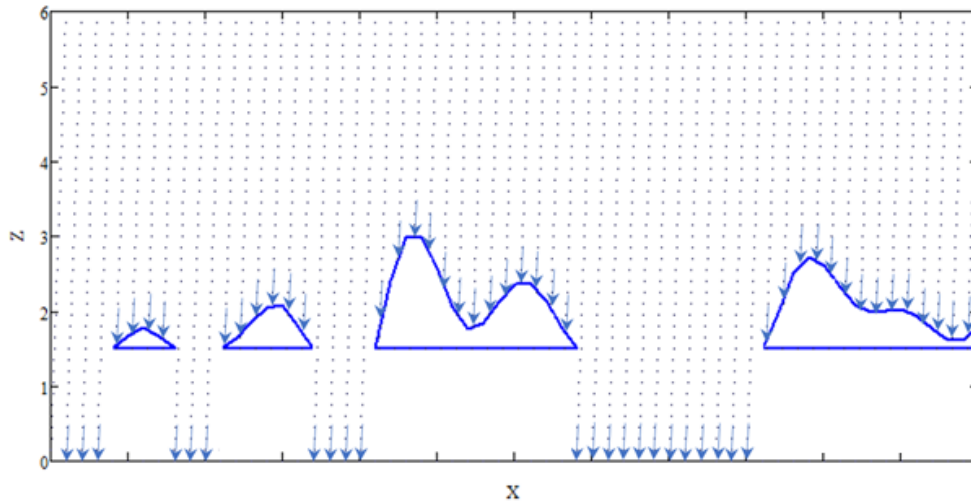


Рисунок 2.3 - Схема моделирования измерений ИК каналов радиометров

Пересечение линий с верхней границей облаков или подстилающей поверхности (показано стрелками) определяют температуру (T) источника, в качестве которого рассматривается АЧТ, причем $T = T_c(z)$ – для облаков; $T = T_s$ – для поверхности:

$$T_c(z) = T_s - k_T \times z, \quad (2.4)$$

где $k_T = 6,5$ К/км [41].

Интенсивность излучения АЧТ рассчитывается по функции Планка:

$$I_0(z_{i,j}) = B(\lambda, T), \quad (2.5)$$

где λ – эффективная длина волны для сравниваемого канала радиометра. Интенсивность I_R , регистрируемая в конкретном спутниковом пикселе, определяется суммой:

$$I_R = \frac{\sum_i \sum_j B(\lambda, T_c(z)) P(T_c(z))}{n^2}, \quad (2.6)$$

где i, j – индексы ячеек сетки, попадающих в пиксель;

n^2 – количество этих ячеек;

$P(T_c(z))$ – функции пропускания атмосферы, полученная параметризацией расчетов LBLRTM по моделям Матрикарди [40]. Яркостная температура пикселя определяется по обратной функции Планка:

$$T_B = B^{-1}(\nu, I_R) \quad (2.7)$$

где ν – длина волны, см^{-1} , – эффективная длина волны канала радиометра.

На рисунке 2.4 приведены результаты сопоставления смоделированных измерений ЯТ МСУ-МР и SEVIRI над морской поверхностью, упорядоченные в порядке возрастания, в зависимости от балла облачности p_0 .

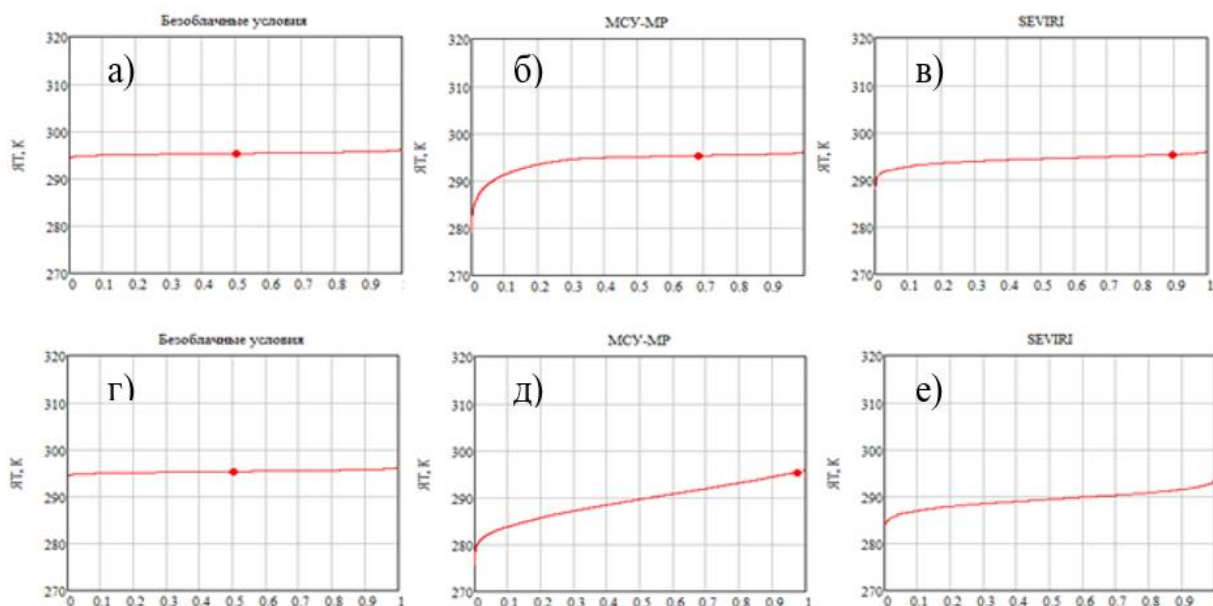


Рисунок 2.4 - Моделирование измерений над морской поверхностью при кучевой облачности: а), г) безоблачные условия; б), в) балл облачности $p_0=1$; д), е) балл облачности $p_0=5$

Красной точкой на графиках обозначено положение средней ЯТ морской поверхности на смоделированном поле измерений. На рисунке 2.4 е) ЯТ, соответствующая измерениям в канале SEVIRI, оказалась справа за пределами графика, а основную часть занимают пиксели, смешанные с облачностью. При анализе графиков сделан вывод о том, что проводить интеркалибровку в области высоких температур ($\sim 290\text{K}$) возможно только при покрытии облаками района интеркалибровки менее 30%. Иначе ЯТ моря и облаков смешиваются и отследить однозначное соответствие ЯТ в данных МСУ-МР и SEVIRI безоблачным условиям невозможно.

2.3 Методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР

Методика интеркалибровки ИК каналов МСУ-МР КА Метеор-М №2 разрабатывалась с использованием спутниковых измерений в аналогичных ИК каналах радиометра SEVIRI геостационарного КА Meteosat-10 (для высоких температур $\sim 290\text{K}$) и измерений температуры воздуха на метеорологических станциях (для низких температур $\sim 230\text{K}$) [45].

Для интеркалибровки в области высоких температур выбираются пиксели радиометра SEVIRI, косинус зенитного угла из пикселя на спутник которых $\cos\alpha_S$ более 0,996. Этим условиям удовлетворяют измерения в подспутниковой точке (0° в.д., 0° с.ш.) КА Meteosat-10 (до февраля 2018 года) и Meteosat-11 (заменил КА Meteosat-10) и ее окрестности, ограниченной радиусом 5 градусов. На рисунке 2.5 показана такая территория Гвинейского залива, используемая для интеркалибровки.

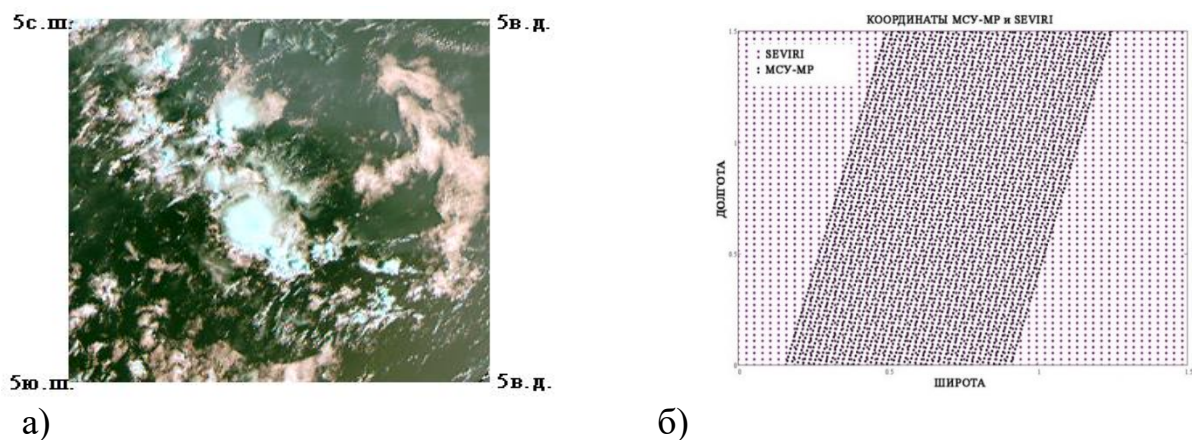


Рисунок 2.5 – Район интеркалибровки – а) территория Гвинейского залива, видимая с КА Meteosat-10, б) – пересечение траектории полярно-орбитального КА и подспутниковой области геостационарного КА

КА Метеор-М №2 пересекает указанный район два раза в сутки (рисунок 2.5 б). Пиксели радиометра МСУ-МР, отбираемые для интеркалибровки, также должны удовлетворять условию наблюдения в надир $\cos\alpha_M$ более 0,996. Из строки сканирования МСУ-МР, состоящей из 1572 элементов, выбираются ± 10 пикселей от центрального пикселя для

соблюдения условия наблюдения одинаковой атмосферной трассы вместе с геостационарным КА.

В основе методики интеркалибровки лежит сравнение средних яркостных температур участков морской поверхности, измеренных в малооблачных условиях каждым радиометром. Интенсивности излучений, измеренные в ИК каналах радиометров, пересчитываются в яркостные температуры по обратной функции Планка из формулы (2.7). В качестве длины волны λ в функции Планка использовались центры каналов SEVIRI и MCSU-MP соответственно.

Из множества пикселей яркостных температур выбор измерений однородной океанской поверхности без участков суши или облачности, попавших в поле зрения обоих приборов в результате ошибок детектирования или невысокого пространственного разрешения ИК каналов, проводится упорядочиванием пикселей в порядке возрастания.

На рисунке 2.6 яркостные температуры океанической поверхности в безоблачных условиях соответствуют линейному участку на графиках измерений MCSU-MP YT_{mcy-mr} и SEVIRI YT_{sev} , а осцилляции на краях отображают сушу (справа) и облачность (слева). Середина линейного участка определяется точкой перегиба полинома третьей степени, аппроксимирующего горизонтальную часть графика без краев, и соответствует средней ЯТ участка океанической поверхности. Величина ΔYT :

$$\Delta YT = \langle YT_{sev} \rangle - \langle YT_{mcy-mr} \rangle \quad (2.8)$$

представляет собой поправку к измерениям MCSU-MP в области высоких температур относительно эталонных.

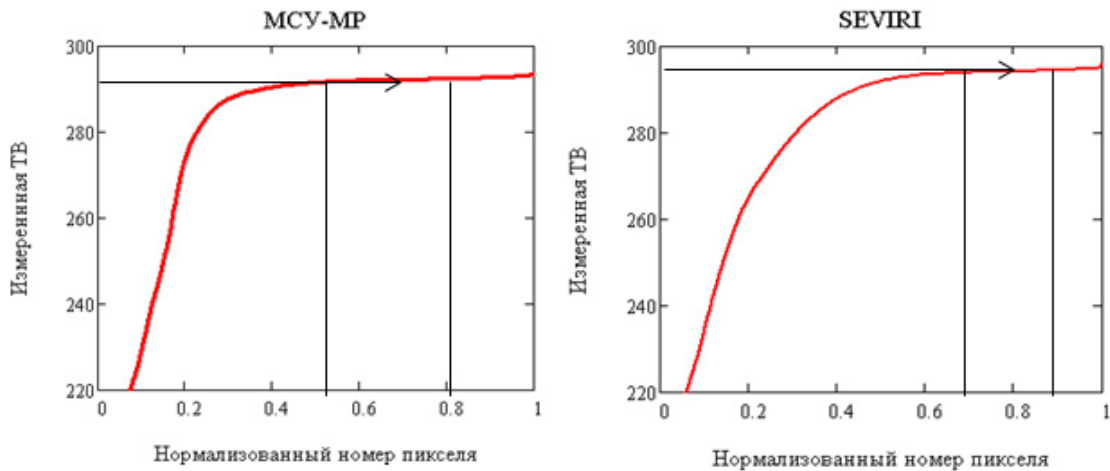


Рисунок 2.6 – Определение яркостных температур однородной океанической поверхности

Преимущество разработанной методики заключается в возможности сопоставлять измерения без уточнения географической привязки пикселей калибруемого прибора, что позволяет ее использовать на начальной стадии ЛИ.

На рисунке 2.7 представлен тренд калибровочных коэффициентов для 5 и 6 каналов МСУ-MP КА Метеор-М №2, полученных за счет обработки ряда наблюдений с 2016 года. По состоянию на конец марта 2022 года смещение в 5-м канале МСУ-MP относительно SEVIRI составляет $\Delta T_{\text{гор}} = -1,24\text{K}$, в 6-ом канале – $\Delta T_{\text{гор}} = -1,40\text{K}$.

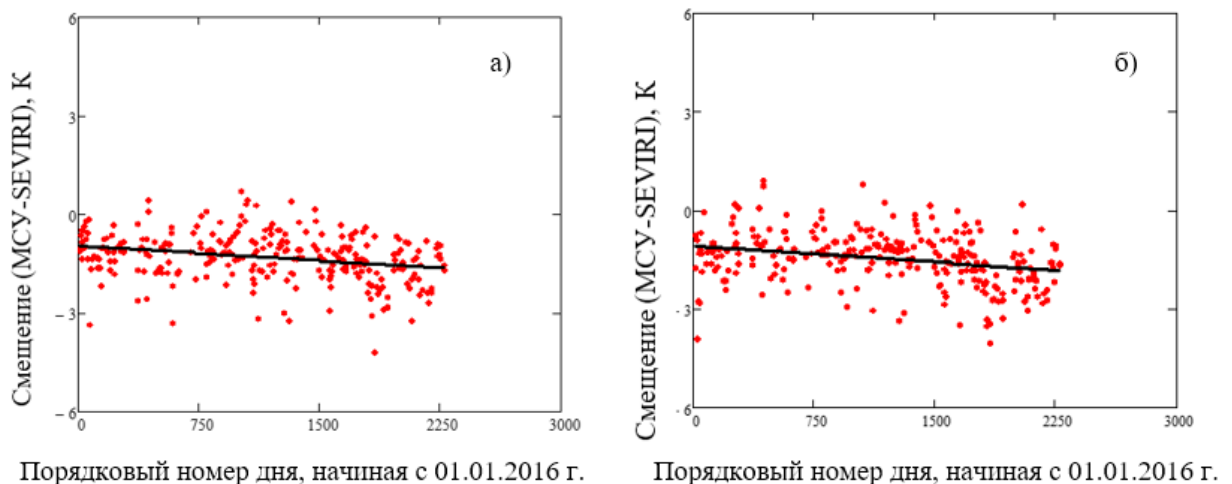


Рисунок 2.7 - Тренд калибровочных коэффициентов для высоких температур (~ 290K) в ИК каналах МСУ-MP КА Метеор-М №2 а) канал №5; б) канал №6

Валидацию измерений в ИК каналах МСУ-MP в области низких температур (~ 230K) предполагалось проводить с использованием измерений

температуры воздуха на высоте 2 м в районах с температурами $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, когда водяной пар практически отсутствует и его влиянием на определение температуры подстилающей поверхности можно пренебречь. Тогда температура поверхности T_{surf} , измеренная контактным методом, практически совпадает с температурой, вычисленной по ЯТ_с (в К) с КА:

$$T_{surf} = ЯТ_c - 273,15\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.9)$$

Апробация методики проводилась с использованием измерений на станциях в Антарктиде – Восток (Россия), Конкордия (Франция, Италия), Купол С II и Амундсен-Скотт (США). Выборка составлялась из дней с отсутствием облачности и температурой воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве референсных спутниковых данных использовались измерения радиометра AVHRR, установленного на полярно-орбитальном КА NOAA и являющегося аналогом прибора МСУ-МР. Отбор спутниковых данных проводился поиском ближайших пикселей к координатам наземной станции ($\pm 0,5^{\circ}$ по широте и долготе) и простым усреднением выбранных пикселей. На рисунке 2.8 видно, что температуры поверхности, измеренные ИКФС-2 и AVHRR, хорошо совпадают с наземными измерениями. В то же время ЯТ, измеренные МСУ-МР, сильно отличаются, т.к. фактические значения ЯТ находятся ниже рабочего динамического диапазона прибора, поэтому точность его измерений не обеспечивается.

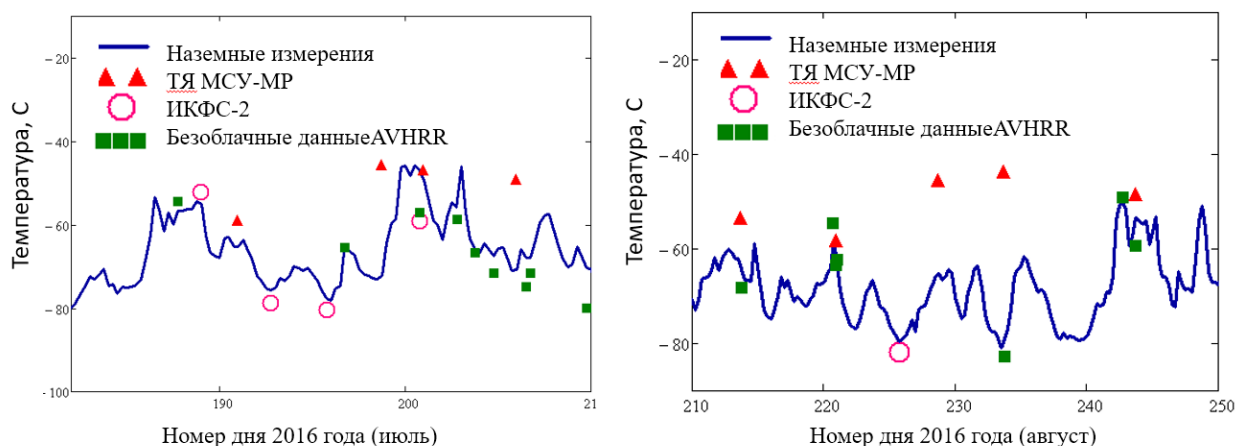


Рисунок 2.8 - Измерения температуры воздуха на станции Восток в июле (слева) и августе (справа) 2016 года

В связи с этим валидация измерений МСУ-МР проводилась с использованием измерений температуры воздуха $T_{метеo}$ на станции Нэви-Оперейтед (о. Гренландия, $72^{\circ} 17'$ с.ш., $38^{\circ} 48'$ з.д.; 3195 м), где

наблюдались более высокие температуры чем в Антарктиде, которые попадали в рабочий динамический диапазон ИК каналов МСУ-МР. Отбор спутниковых данных проводился также, как и для радиометра AVHRR – поиском ближайших центральных пикселей строки сканирования МСУ-МР (± 5 пикселей) к координатам наземной станции ($\pm 0,5$ градусов по широте и долготе) и простым усреднением выбранных пикселей $\langle T_{МСУ-МР} \rangle$. На рисунке 2.9 черными точками показаны измеренные МСУ-МР яркостные температуры и пересчитанные по формуле (2.9) $T_{МСУ-МР}$, а красной линией – измерения температуры воздуха на станции. Среднее смещение $\Delta T_{хол}$ температур, измеренных МСУ-МР, относительно наземных измерений Нэви-Оперейтед составляет $\Delta T_{хол} = -2,3$ °С, СКО – $3,9$ °С, коэффициент корреляции $0,9$ [46].

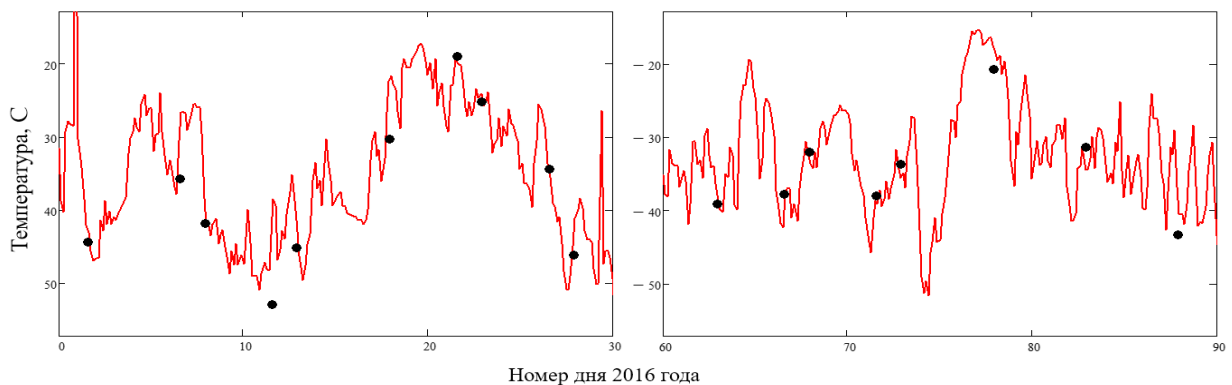


Рисунок 2.9 Валидация измерений МСУ-МР в области низких температур (Нэви-Оперейтед, о. Гренландия)

Контроль калибровки осуществлялся с использованием измерений температуры воздуха на мачте научной станции ZOTTO, расположенной в Туруханском районе Красноярского края, и измерений фурье-спектрометра ИКФС-2. По данным в видимых каналах МСУ-МР выбирались только безоблачные дни. При сравнении измерений на 6 уровнях высотной мачты выбирались дни с отсутствием температурной инверсии.

Пиксель ИКФС-2, диаметром 35 км, замещался пикселями МСУ-МР (линейный размер в ИК каналах – 1 км). Вычислялась средняя ЯТ для каждого множества значений МСУ-МР. Измерения в каналах ИКФС-2 сворачивались со спектрально-аппаратной функцией ИК каналов МСУ-МР и

пересчитывалась в ЯТ по формуле (2.7), где в качестве длины волны λ в функции Планка использовались центры каналов МСУ-МР.

Среднее смещение измерений МСУ-МР:

$$\Delta T_{хол} = \langle T_{МСУ-МР} \rangle - T_{икфс}, \quad (2.10)$$

где $\langle T_{МСУ-МР} \rangle$ – средняя ЯТ для поля зрения пикселя ИКФС-2, измеренная в канале МСУ-МР, $T_{икфс}$ – ЯТ ИКФС-2, свернутая с САФ МСУ-МР, на станциях Нэви-Оперейтед и Зотино (ZOTTO) хорошо согласуется и составляет примерно 3К (Рисунок 2.10).

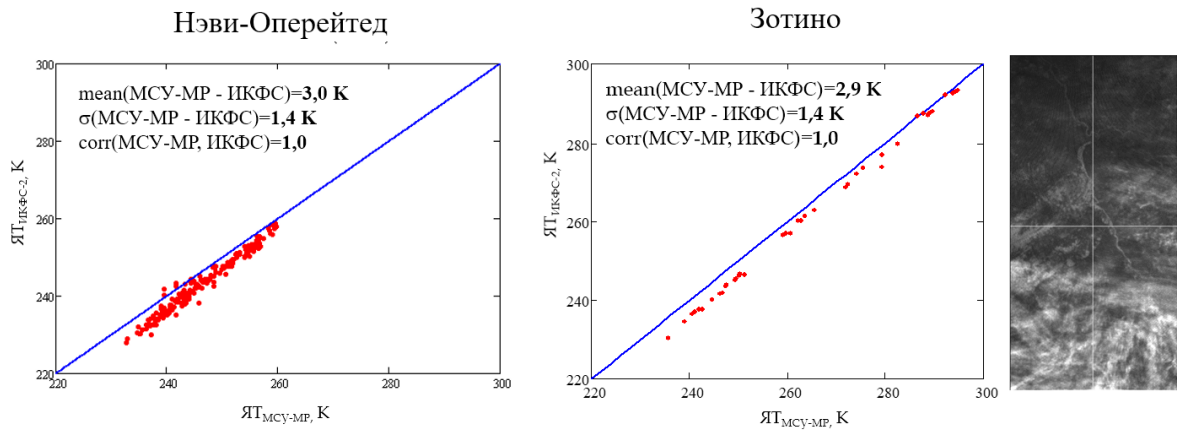


Рисунок 2.10 Контроль калибровки МСУ-МР в области низких температур

Для нахождения коэффициентов калибровки в диапазоне между 290К и 230К построена простая линейная интерполяция между $\Delta T_{гор}$ и $\Delta T_{хол}$.

Проверка полученных калибровочных коэффициентов проводилась на одновременных с SEVIRI измерениях ЯТ над Гвинейским заливом по всему диапазону ЯТ. Измерения МСУ-МР и SEVIRI размещались в ячейках сетки 0,1x0,1 градус с СКО пикселей ЯТ менее 0,5К. Применение поправочных коэффициентов уменьшило медианное смещение измерений МСУ-МР относительно SEVIRI с -1,6К до -0,4К.

Разработанная методика интеркалибровки применялась для ИК каналов МСУ-МР КА Метеор-М №2-2. На рисунке 2.11 приведены результаты интеркалибровки в области высоких температур, начиная с января 2020 года.

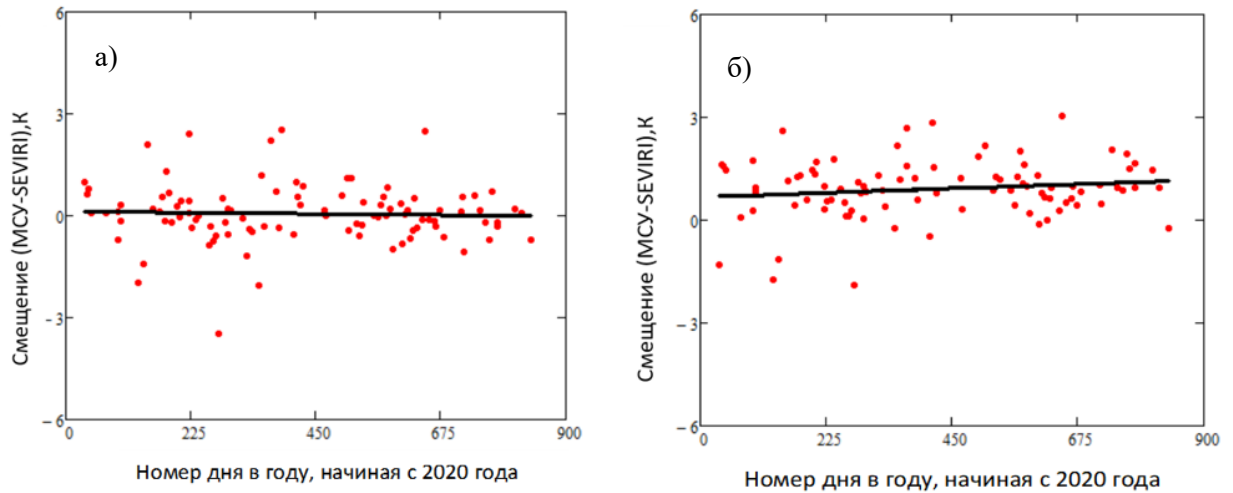
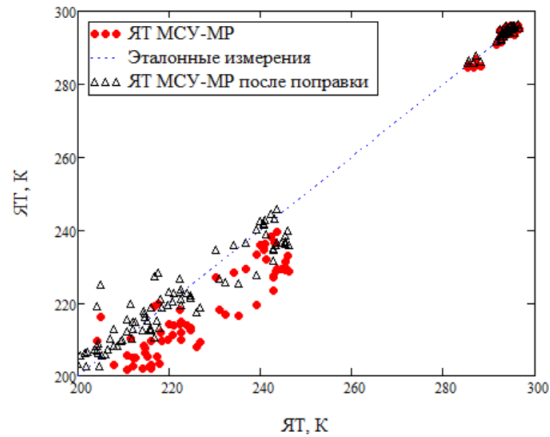


Рисунок 2.11 - Тренд калибровочных коэффициентов для высоких температур (~ 290К) в ИК каналах МСУ-МР КА Метеор-М №2-2 а) канал №5; б) канал №6

Валидация измерений в области низких температур проводилась по аналогичной методике с использованием измерений на станции Восток (Антарктида), так как нижняя граница динамического диапазона МСУ-МР на КА Метеор-М № 2-2 была сдвинута в сторону 190К. Среднее смещение измерений $\Delta T_{хол} = -9^\circ\text{C}$:

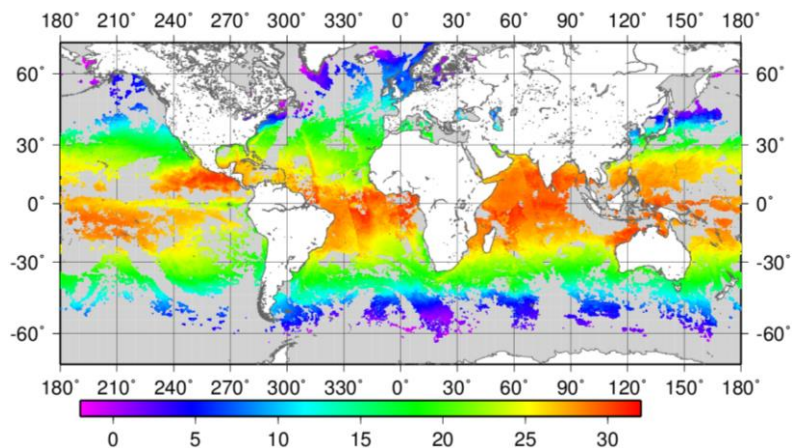
$$\Delta T_{хол} = \langle T_{МСУ-МР} \rangle - T_{метео} \quad (2.11)$$

Проверка полученных величин проводилась по данным измерений на станции Конкордия (Антарктида). На рисунке 2.12 на примере измерений в канале №5 МСУ-МР показана калибровочная кривая для всего диапазона измеряемых МСУ-МР яркостных температур. Проверка применения коэффициентов проводилась также на одновременных с SEVIRI измерениях над Гвинейским заливом, усредненных в ячейках 0,1 градусной сетки с СКО пикселей меньше 1К.



**Рисунок 2.12 - Калибровочные коэффициенты для 5-го канала МСУ-МР
КА Метеор-М 2-2**

Как показала Е. А. Фролова [47], после учета результатов интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР КА Метеор-М №2-2 значительно уменьшилось расхождение (до $\sim 1\text{K}$) в оценках температуры поверхности Мирового океана этим прибором и буйковыми измерениями, используемыми в качестве эталонных (Рисунок 2.13):



**Рисунок 2.13 – Карта температуры поверхности Мирового океана по данным
КА Метеор-М №2-2 за период 04:28 – 22:40 UTC 2022.04.20**

2.4 Интеркалибровка фурье-спектрометра ИКФС-2

Методика интеркалибровки фурье-спектрометра ИКФС-2 предполагает использование измерений радиометра SEVIRI, установленного на европейском геостационарном КА Meteosat-10, в качестве эталонных. В основе методики лежит сравнение данных измерений интенсивности $R_{\text{икфс}}$ уходящего излучения подстилающей поверхности в каналах

фурье-спектрометра, свернутых с САФ SEVIRI, и данных прямых измерений ИК каналов радиометра SEVIRI [48]. Выбор SEVIRI референсным прибором обусловлен стабильностью его работы и высокой точностью бортовой калибровки [8]. На рисунке 2.14 изображен спектр измерений ИКФС-2 и спектральные ИК каналы SEVIRI, используемые в интеркалибровке.

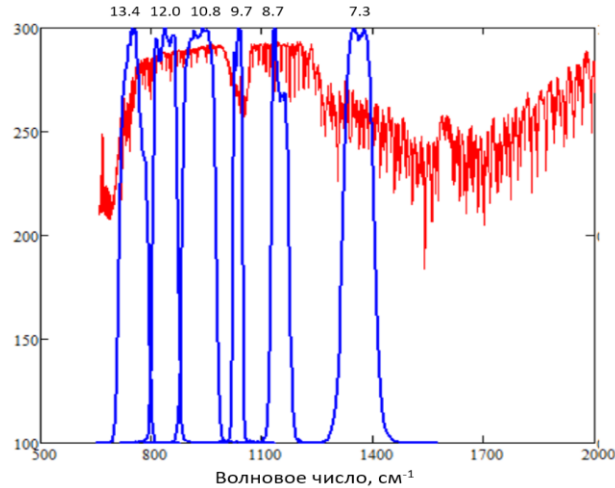


Рисунок 2.14 - График спектральных функций каналов SEVIRI и ИКФС-2

Для интеркалибровки выбираются пиксели SEVIRI, косинусы зенитного угла из пикселя на спутник которых $\cos \alpha_S$ более 0,996. Этим условиям удовлетворяют пиксели ЯТ в районе Гвинейского залива в подспутниковой точке КА Meteosat, ограниченного 5 градусами по широте и долготе. Пиксели ИКФС-2 также должны удовлетворять условию наблюдения в надир: $\cos(\alpha_I)$ более 0,996. Для режима съемки ИКФС-2, в котором полоса обзора составляет 1000 км, общее количество пикселей в полосе сканирования равно 15, а условие «в надир» выполняется для 7, 8 и 9 пикселей [20].

Интенсивность излучения $R_{\text{ИКФС}}$, регистрируемая в каналах ИКФС-2, пересчитывается в яркостную температуру $Y_{\text{ИКФС}}$ с использованием обратной функции Планка по формуле (2.7), где $I_R = R_{\text{ИКФС}}^*$:

$$R_{\text{ИКФС}}^* = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\text{ИКФС}}(\lambda) \cdot f_{\text{СК}}(\lambda) d\lambda. \quad (2.12)$$

Здесь $f_{\text{СК}}(\lambda)$ – спектральная функция чувствительности канала SEVIRI;

$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_{\text{СК}}(\lambda) d\lambda$ - норма $f_{\text{СК}}(\lambda)$;

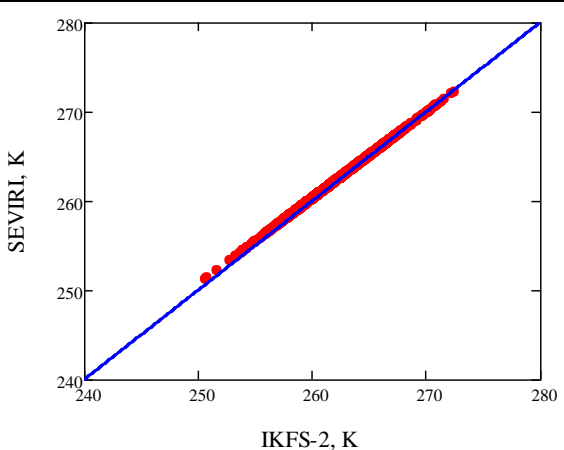
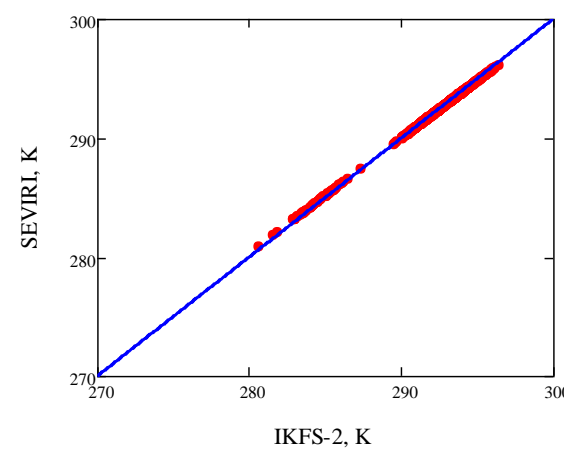
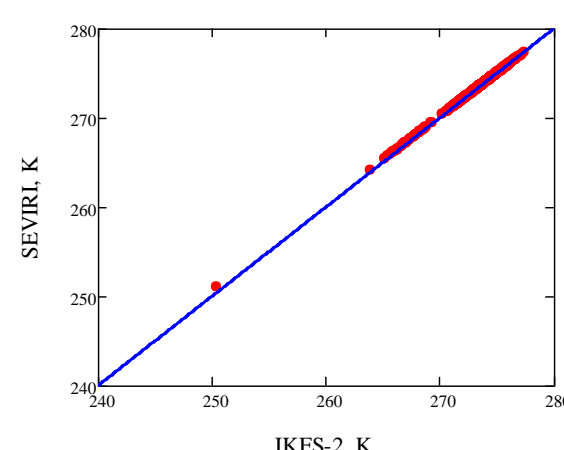
λ_1, λ_2 – границы рабочей спектральной полосы канала.

Для вычисления поправки к вычисленным $Y_{\text{ИКФС}}$ необходимо рассчитать Y_{sev} , соответствующую средней Y_{T} в пикселях SEVIRI (3 км), попавших в поле зрения пикселя ИКФС-2 (~ 35 км) в радиусе 15 км от координат его центра. Отбор значений Y_{sev} для интеркалибровки осуществляется по СКО Y_{T} : для каналов 7.3, 8.7, 9.7, 10.8 и 12.0 мкм СКО пикселей SEVIRI, попавших в поле зрения одного пикселя ИКФС-2, не должно превышать 0,2К, для канала 13.4 мкм – 0,3К. Разности $\Delta T_{\text{я}}$ между рассчитанными $Y_{\text{ИКФС}}$ и непосредственно измеренными Y_{sev} радиометром SEVIRI представлены на графиках в Таблице 2.1 для всех перечисленных выше каналов SEVIRI.

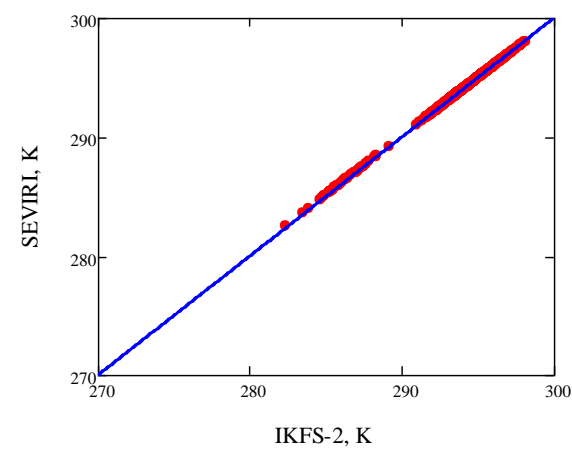
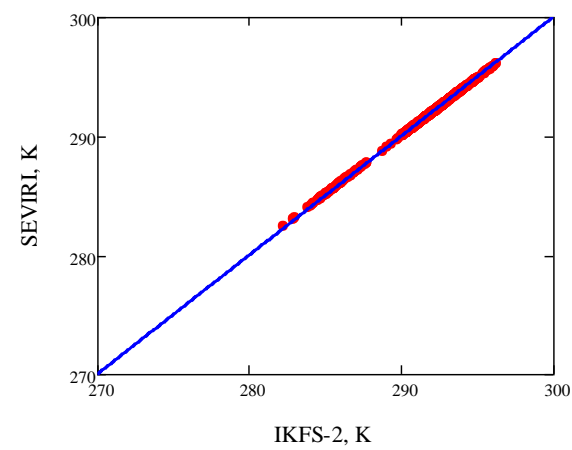
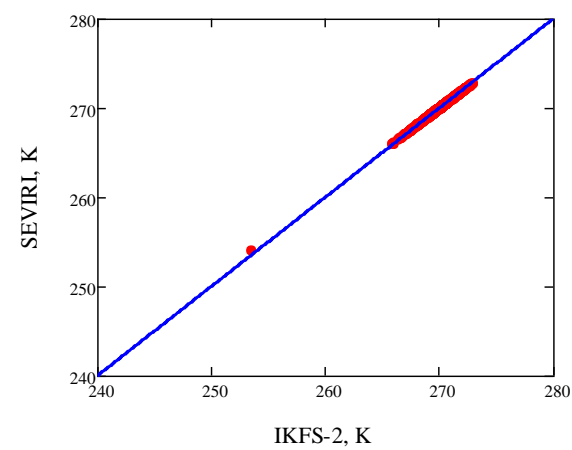
До февраля 2018 года интеркалибровка проводилась по данным SEVIRI КА Meteosat-10, который затем был заменен на КА Meteosat-11. Каких-либо изменений в калибровочных коэффициентах для ИКФС-2 не произошло, за исключением коэффициентов для канала 13.4 мкм, что объясняется погрешностью измерений непосредственно в самом канале SEVIRI [49]. У SEVIRI, установленном на КА Meteosat-11, разница с измерениями IASI составляет менее 0.5К. Методика интеркалибровки была разработана совместно с ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» – разработчиками прибора ИКФС-2 [49, 50].

Отличие разработанной методики от описанной в [49] заключается в том, что углы визирования для SEVIRI ограничиваются 5 градусами по широте и долготе (акватория Гвинейской залива). Это уменьшает вероятность возможного влияния облачного параллакса на результаты интеркалибровки, когда одно и то же облако будет по-разному идентифицироваться с геостационарного и полярно-орбитального КА. Как видно из представленных графиков, ИКФС-2 обладает стабильностью радиометрических характеристик. Смещение относительно измерений эталонного радиометра SEVIRI лежат в пределах 0,5К, а для ИК «окна прозрачности» атмосферы разница в измерениях составляет менее 0,1К. 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.

Таблица 2.1 Сравнение измерений ИКФС-2 с эталонными данными SEVIRI над акваторией Гвинейского залива

Центр канала SEVIRI, мкм	7.3	 <p>SEVIRI, К</p> <p>ИКФС-2, К</p> <p>$y = 9,860 + 0,963x$</p>
Количество пикселей SEVIRI	~100	
Пороговое значение для отбора пикселей SEVIRI (СКО SEVIRI), К	< 0,2	
Смещение (ИКФС-2- SEVIRI), К	-0,234	
СКО (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,230	
Центр канала SEVIRI, мкм	8.7	 <p>SEVIRI, К</p> <p>ИКФС-2, К</p> <p>$y = 10,179 + 0,965x$</p>
Количество пикселей SEVIRI	~100	
Пороговое значение для отбора пикселей SEVIRI (СКО SEVIRI), К	< 0,2	
Смещение (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,095	
СКО (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,414	
Центр канала SEVIRI, мкм	9.7	 <p>SEVIRI, К</p> <p>ИКФС-2, К</p> <p>$y = 7,214 + 0,974x$</p>
Количество пикселей SEVIRI	~100	
Пороговое значение для отбора пикселей SEVIRI (СКО SEVIRI), К	< 0,2	
Смещение (ИКФС-2- SEVIRI), К	-0,155	
СКО (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,334	

Продолжение таблицы 2.1

Центр канала SEVIRI, мкм	10.8	 <p>SEVIRI, К</p> <p>IKFS-2, К</p> <p>$y = 5,409 + 0,982x$</p>
Количество пикселей SEVIRI	~100	
Пороговое значение для отбора пикселей SEVIRI (СКО SEVIRI), К	< 0,2	
Смещение (ИКФС-2- SEVIRI), К	-0,082	
СКО (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,400	
Центр канала SEVIRI, мкм	12.0	 <p>SEVIRI, К</p> <p>IKFS-2, К</p> <p>$y = 7,076 + 0,976x$</p>
Количество пикселей SEVIRI	~100	
Пороговое значение для отбора пикселей SEVIRI (СКО SEVIRI), К	< 0,2	
Смещение (ИКФС-2- SEVIRI), К	-0,006	
СКО (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,38	
Центр канала SEVIRI, мкм	13.4	 <p>SEVIRI, К</p> <p>IKFS-2, К</p> <p>$y = 9,14 + 0,966x$</p>
Количество пикселей SEVIRI	~100	
Пороговое значение для отбора пикселей SEVIRI (СКО SEVIRI), К	< 0,3	
Смещение (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,062	
СКО (ИКФС-2- SEVIRI), К	0,287	

ГЛАВА 3 ИНТЕРКАЛИБРОВКА ИНФРАКРАСНЫХ КАНАЛОВ РАДИОМЕТРА МСУ-ГС

3.1 Интеркалибровка МСУ-ГС/Электро-Л №1 по данным зондировщика AIRS

КА Электро-Л № 1 был запущен в 2011 году в точку стояния 76° в. д. Анализ информации видимых и инфракрасных каналов радиометра МСУ-ГС, проводимый во время летных испытаний, показал, что данные в 4-м, 5-м и 10-м каналах сильно зашумлены и такую информацию можно использовать только в качестве вспомогательной [29]. Тем не менее, необходимо было оценивать радиометрические характеристики ИК каналов МСУ-ГС (№7-10) и разработать методику интеркалибровки для будущих радиометров на КА серии Электро-Л.

Интеркалибровка МСУ-ГС осуществлялась по схеме Geo-Leo. В качестве эталонных данных использовались измерения ИК зондировщика AIRS (The Atmospheric Infrared Sounder), установленного на борту полярно-орбитального КА EOS/Aqua. Спектрометр AIRS измеряет интенсивность ИК излучения Земли в спектральном диапазоне от 3,75 до 15,4 мкм с помощью 2 378 каналов в интервалах от 6,20 до 8,22 мкм, от 8,80 до 15,40 мкм. Размер пикселя в надире составляет 13,5 км, полоса захвата ~ 1650 км [11]. Бортовая калибровка спектрометра проводится по трем независимым эталонным источникам, а определение собственного излучения прибора происходит аналогично радиометру МСУ-ГС – при наблюдении космоса.

Валидация получаемых AIRS данных проводилась над различными типами земной поверхности и в различных условиях с использованием измерений эталонного спектрометра, установленного на самолете ER-2. Например, по результатам эксперимента над Мексиканским заливом измерения зондировщика на 0,2К и меньше отличаются от измерений самолетного спектрометра [51].

Учитывая высокую точность и стабильность измерений AIRS, рабочая группа GSICS с 2008 предложила использовать AIRS в качестве эталона для интеркалибровки ИК-каналов различных геостационарных КА – американского GOES, европейского Meteosat, китайского Fengyun [52].

Методика интеркалибровки по схеме Geo-Leo основана на сравнении прямых измерений интенсивности уходящего излучения $R_{ск}$ непосредственно в каналах радиометра МСУ-ГС и расчетных $R_{ск}^*$, полученных сверткой спектров излучения, измеренных в каналах AIRS, со спектральными аппаратными функциями ИК каналов МСУ-ГС.

Проверка применимости методики была выполнена с использованием моделирования переноса уходящего излучения программой LBLRTM [52, 38] и сверткой спектров со спектральными аппаратными функциями каналов МСУ-ГС. В рабочей полосе каждого ИК канала МСУ-ГС находится порядка 200 спектральных каналов AIRS шириной примерно (0,0025-0,005) мкм в шкале длин волн λ в районе 10 мкм [53]. Для ускорения расчетов была выполнена замена реальных измерений AIRS их интерполяцией кубическим сплайном по опорным измерениям в его каналах.

$$R_{ск}^* = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{AIRS}^c(\lambda) \cdot f_{ск}(\lambda) d\lambda, \quad (3.1)$$

где $f_{ск}(\lambda)$ – спектральная функция чувствительности ИК канала радиометра МСУ-ГС;

$$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_{ск}(\lambda) d\lambda - \text{норма } f_{ск}(\lambda);$$

λ_1, λ_2 – границы рабочей спектральной полосы ИК канала МСУ-ГС.

Оценка ошибки интегрирования в (3.1) при замене реального спектра его аппроксимацией кубическим сплайном проводилась на основе моделирования интенсивности уходящего излучения в зависимости от частоты ν с помощью LBLRTM. Спектральное разрешение в расчетах составляет $\Delta\nu = 0,001 \text{ см}^{-1}$, т.е. в 250÷500 раз выше, чем разрешение AIRS. Смоделированное значение интенсивности $R_{ск}$ определялось как интеграл:

$$R_{\text{ск}} = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot f_{\text{ск}}(\lambda) d\lambda, \quad (3.2)$$

где $R(\lambda) = R(\frac{10^4}{\nu})$ – уходящее излучение, рассчитанное LBLRTM, в зависимости от ν .

Расчеты применительно к 9 и 10 каналам МСУ-ГС были выполнены для трех моделей летней атмосферы: MLS – лето средних широт, TRP – тропическая, US1976 – стандартная модель США. Опорные значения для получения сплайна R_i^* , моделирующего измерения в каналах AIRS, рассчитываются сверткой интенсивности уходящего излучения $R(\nu)$ с САФ каналов AIRS $f_{\text{AIRS}}(\nu - \nu_{0i})$:

$$R_i^* = \int_{\Delta\nu} R(\nu) \cdot f_{\text{AIRS}}(\nu - \nu_{0i}) d\nu, \quad (3.3)$$

где ν_{0i} – частота центра i -го канала AIRS.

Аналог (3.2), в котором вместо аппроксимации данных измерений сплайном $R_{\text{AIRS}}^c(\lambda)$ интерполировались результаты расчетов (3.3), использовался для получения

$$R_{\text{ск}}^* = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i^*(\lambda) \cdot f_{\text{ск}}(\lambda) d\lambda \quad (3.4)$$

Для удобства сравнения интенсивности излучения $R_{\text{ск}}$ и $R_{\text{ск}}^*$, пересчитывались в яркостные температуры по формуле (2.7), где в качестве длины волны в функции Планка использовались центры каналов МСУ-ГС. Определялись их разности $\Delta T_{\text{я}}$. Для всех моделей атмосферы и каналов МСУ-ГС существует небольшое смещение ($\sim 0,15\text{K}$) между результатами расчетов по (3.2) и (3.4), обусловленное спектральным положением каналов AIRS и линиями поглощения атмосферных газов. Это смещение слабо меняется при переходе от одной модели к другой и может быть учтено по среднему значению. Разброс относительно среднего не превышает $0,03\text{K}$, что примерно в 10 раз меньше дробового шума фотоприемников [34], поэтому ошибка интегрирования (3.2) при вычислении $R_{\text{ск}}^*$ не будет вносить существенной погрешности в получаемые интеркалибровкой поправки к измерениям радиометров.

Интеркалибровка ИК каналов радиометра МСУ-ГС (№7-10) проводилась с использованием измерений ИК зондировщика AIRS за период ноябрь 2013 года – март 2014 года над Индийским океаном в районе подспутниковой точки КА Электро-Л №1. На рисунке 3.1 цветом выделена гранула, получаемая за пять минут измерений AIRS, на изображении земного диска в канале №10 МСУ-ГС.

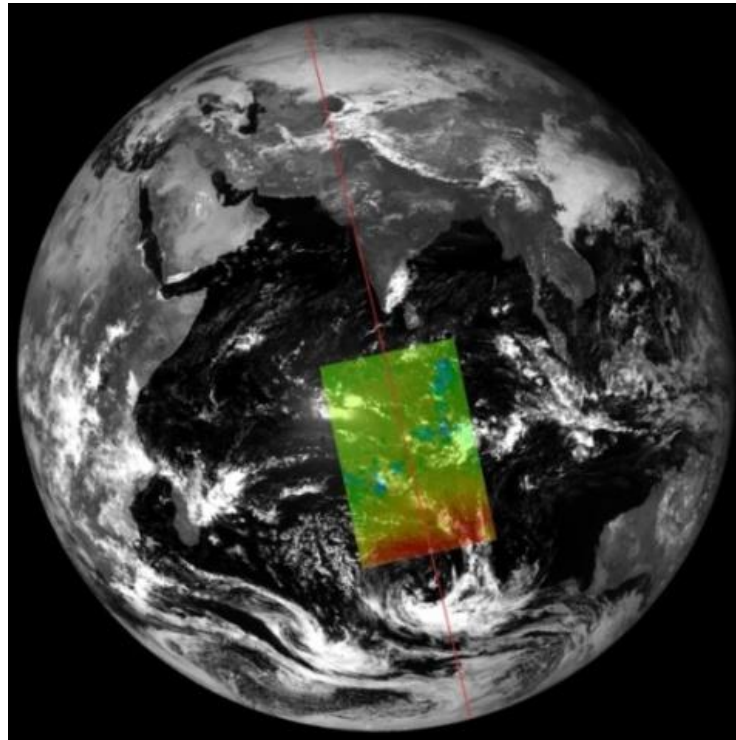


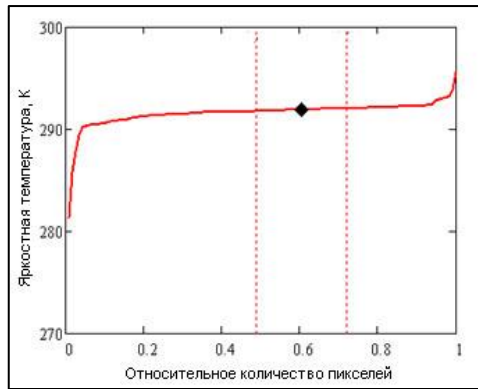
Рисунок 3.1 - Район интеркалибровки МСУ-ГС КА Электро-Л №1

Для интеркалибровки отбирались пиксели AIRS и МСУ-ГС с измерениями интенсивности излучения над поверхностью океана. Зенитный угол визирования соответствующего КА из пикселя составлял не более 5 градусов. Разница по времени между проведением измерений приборов полярно-орбитального и геостационарного КА не превышала 10 минут.

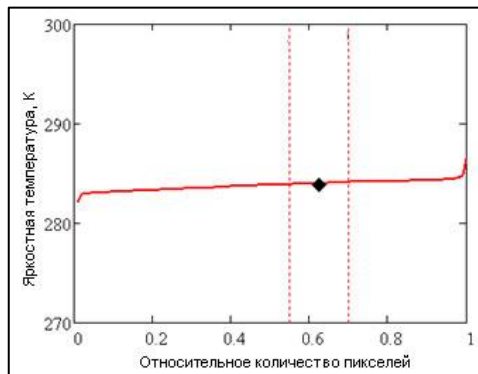
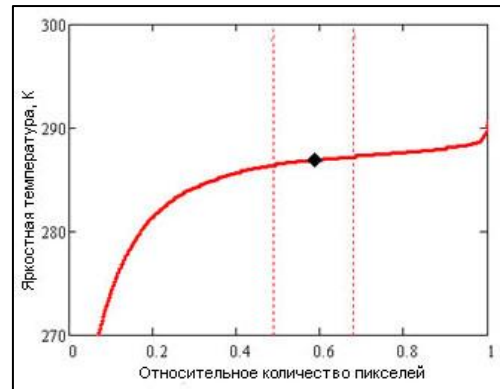
Дневное время было выбрано для повышения эффективности алгоритма детектирования облачности спектрометром AIRS. Пространственные и оптические характеристики облачности быстро меняются со временем, поэтому облачность, учитывая различные линейные размеры пикселей МСУ-ГС (~ 4 км) и AIRS (~ 13,5 км) и время наблюдения, является основным фактором, влияющим на расхождение в результатах измерений, но не

связанным с метрологическими характеристиками самих приборов. Начиная с 11-12 часов местного времени, в тропиках над Индийским океаном происходит активный процесс облакообразования [54]. AIRS пересекает экватор в 13:00÷13:30 местного времени. Для этого срока (8:00÷8:30 UTC – всемирного или универсального времени) в районе подспутниковой точки Электро-Л часто наблюдалась сильная облачность, поэтому из полугодичного периода наблюдений для проведения интеркалибровки были отобраны данные только за 21 день (условия безоблачной или малооблачной погоды). Тем не менее, в пикселях, классифицированных алгоритмами детектирования как безоблачные, какие-то облака могут присутствовать. Вероятность попадания облаков возрастает с увеличением размера пикселя прибора. Для пикселей, близких по размеру к пикселям AIRS, согласно оценкам [55, 56], эта вероятность может достигать десятков процентов.

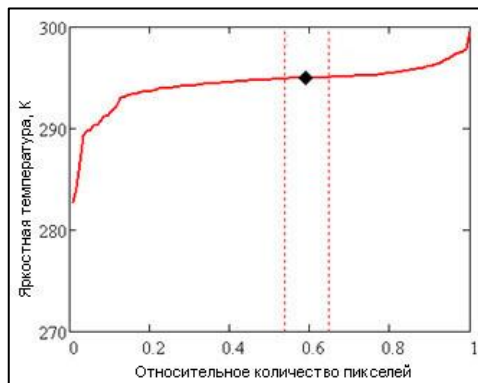
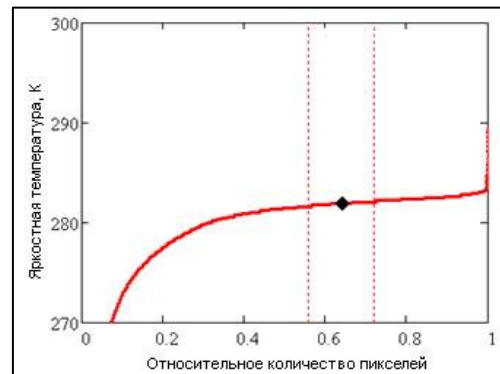
На рисунке 3.2 отображены упорядоченные в порядке возрастания значения яркостных температур T_y , вычисленные по данным измерений AIRS (слева) с учетом спектральной функции ИК каналов МСУ-ГС, и непосредственно измеренные МСУ-ГС (справа) 21 декабря 2013 г. В условиях проведения интеркалибровки (экватор, полдень, океан) попадание облачности или суши в спутниковый пиксель будет занижать или завышать температуру. Линейный участок кривой соответствует однородной океанической поверхности, измерения ЯТ которой сопровождается только аппаратным инструментальным шумом ($\sim 0,3\text{K}$). Он является небольшим по сравнению с осцилляциями, которые могут достигать 10K и более, на краях графика из-за облаков или суши.



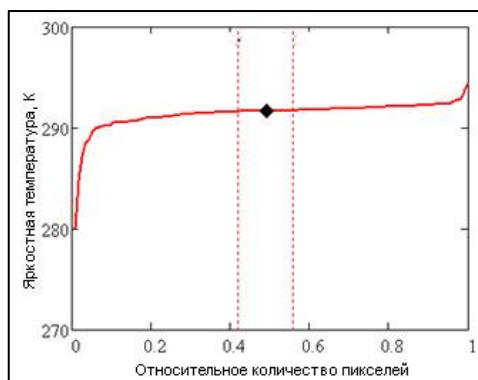
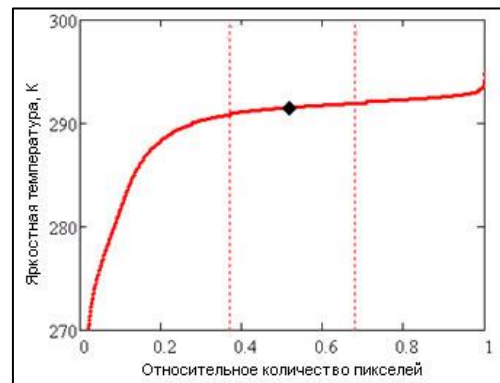
а)



б)



в)



г)

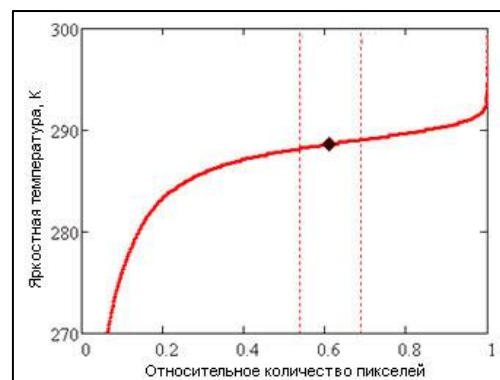


Рисунок 3.2 - Упорядоченные значения яркостных температур, вычисленных по данным AIRS (слева) и измеренных в ИК каналах МСУ-ГС (справа) на 21 декабря 2013 г. Каналы МСУ-ГС: №7 (а), №8(б), №9(в) и №10(г)

Определение середины линейного участка для сравнения двух яркостных температур осуществлялось визуально независимо тремя операторами. Кроме того, проводилась проверка визуального метода аналитическим. В этом случае центр линейного участка определялся как точка перегиба полинома третьей степени, аппроксимирующего центральную часть графика (без краев). Разница в значениях, полученных визуальным и аналитическим методами, не превышала 0,1К.

Результаты интеркалибровки – разности $\Delta T_{\text{я}}$ в яркостных температурах, вычисленных описанным выше способом по данным AIRS и МСУ-ГС, – приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты интеркалибровки данных в ИК каналах МСУ-ГС

Дата	UTC	$\Delta T_{\text{я}}$			
		Канал №7	Канал №8	Канал №9	Канал №10
08.11.2013	08:00	-	2,5	2,3	-
24.11.2013	08:00	6,1	0,6	3,0	2,3
19.12.2013	08:00	5,5	2,2	3,0	-
21.12.2013	08:00	4,6	2,0	-	3,0
22.12.2013	08:00	5	2,6	2,7	-
04.01.2014	08:00	4,9	2,3	3,3	3,4
11.01.2014	08:00	4,5	1,9	3,0	-
13.01.2014	08:00	4,6	2,6	2,9	2,1
16.01.2014	08:30	4,1	2,0	2,6	2,7
20.01.2014	08:00	5,8	2,6	3,8	3,9
25.01.2014	08:30	3,9	0,9	1,8	-
27.01.2014	08:00	5,1	1,8	2,6	2,2
01.02.2014	08:30	5,2	2,2	2,8	-
07.02.2014	08:30	4,6	2,1	3,1	2,7
10.02.2014	08:30	6,3	2,3	2,1	3,7
12.02.2014	08:00	4,5	2,2	2,9	2,8
17.02.2014	08:30	4,1	1,0	1,7	2,2
19.02.2014	08:30	4,3	1,7	2,6	2,1
21.02.2014	08:00	4,3	0,7	2,7	2,6
23.02.2014	08:00	4,3	3,8	2,6	2,2

Дата	UTC	ΔT_y			
		Канал №7	Канал №8	Канал №9	Канал №10
24.02.2014	08:30	4,2	2,0	3,1	3,3
Среднее:		4,8	2,0	2,7	2,7
Среднекв. отклон.:		0,7	0,7	0,5	0,6

Регрессионные зависимости поправок ΔT_y от порядкового номера дня представлены на рисунке 3.3. Для канала №7 МСУ-ГС наблюдается незначительный временной дрейф, характеризуемый коэффициентом корреляции $R=0,46$. Для остальных каналов смещение ΔT_y практически постоянно и не зависит от даты.

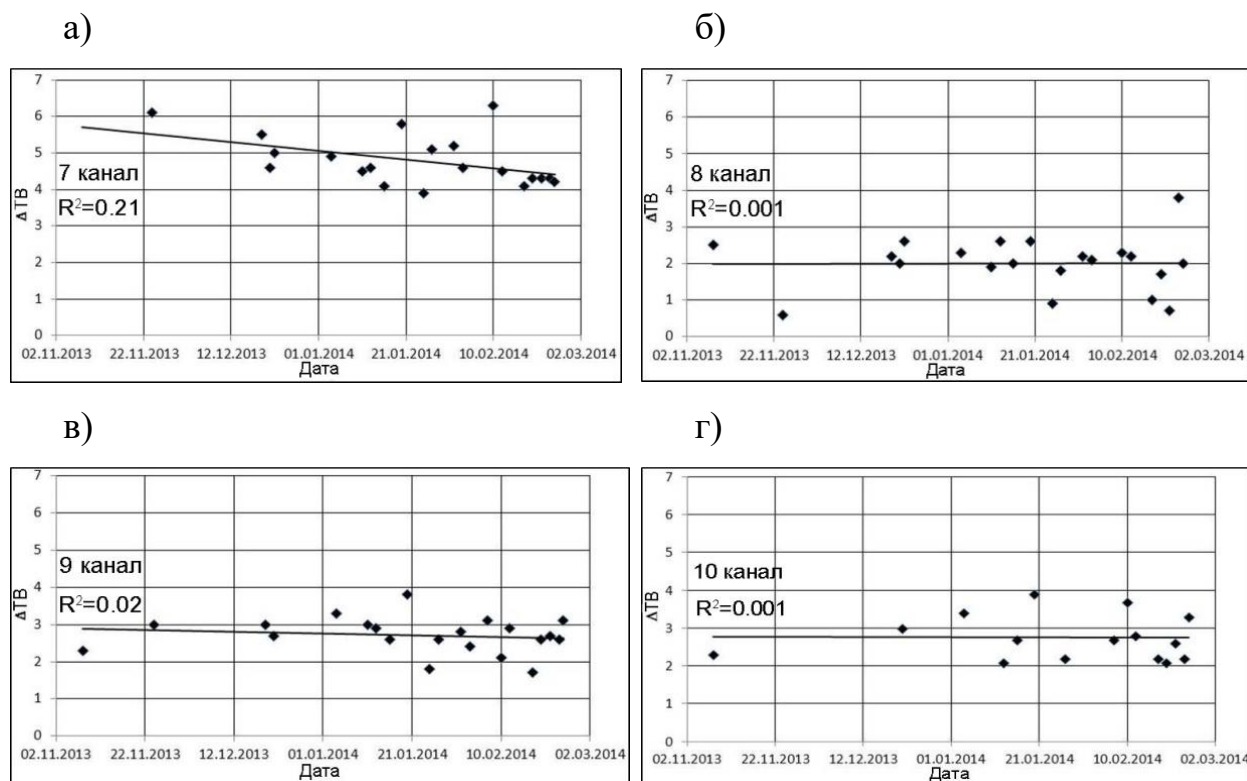


Рисунок 3.3 – Регрессионные зависимости поправок ΔT_y для каналов № 7-10 МСУ-ГС от порядкового номера дня

После устранения систематического смещения, как это следует из Таблицы 3.1, случайная ошибка калибровки будет лежать в диапазоне от 0,5 до 0,7K.

Проверка разработанной методики интеркалибровки по данным спектрометра AIRS проводилась применительно к ИК каналам 10.8 мкм и

12.0 мкм радиометра SEVIRI, установленном на геостационарном КА Meteosat-10, для трех дней января 2013 года над Гвинейским заливом в «надире» для точки стояния КА.

SEVIRI сканирует видимый Земной диск каждые 15 минут, поэтому время проведения измерений AIRS отличалось от времени проведения измерений SEVIRI не более, чем на пять минут. В остальном интеркалибровка ИК каналов SEVIRI полностью соответствовало интеркалибровке МСУ-ГС и AIRS: измерения AIRS сворачивались со спектральными аппаратными функциями SEVIRI, пересчитывались с использованием функции Планка в яркостные температуры. Затем яркостные температуры для обоих приборов упорядочивались в порядке возрастания (рисунок 3.4), а смещение находилось как разница ординат центров линейного участка обеих кривых.

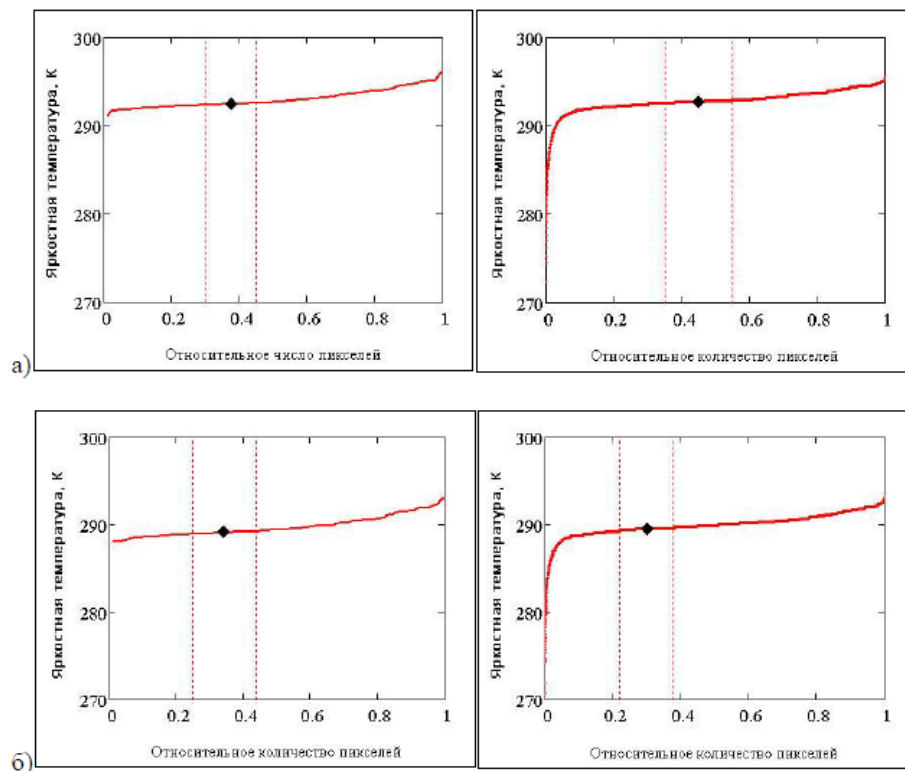


Рисунок 3.4 – Интеркалибровка SEVIRI по данным измерений AIRS

Среднее смещение яркостных температур $\Delta T_{\text{Я}}$ SEVIRI относительно измерений, вычисленных по данным AIRS, для каналов 10.8 и 12.0 мкм составляет 0,4К и 0,6К соответственно. Эти результаты хорошо совпадают с

результатами сопоставления измерений AIRS и SEVIRI, IASI и SEVIRI, представленными в [52, 57].

3.2 Методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-ГС КА Электро-Л №2 по данным радиометров других геостационарных спутников

КА Электро-Л №2 был запущен 11 декабря 2015 года в точку стояния 76° в. д. взамен КА Электро-Л №1. Сразу после запуска выяснилось, что радиационный холодильник МСУ-ГС из-за нештатной работы не может поддерживать рабочую температуру (78К) фотоматрицы светоприемного устройства. Это привело к тому, что при эксплуатации на орбите аппаратные функции (АФ) ИК каналов радиометра МСУ-ГС, связывающие мощность оптического сигнала на входе светоприемного устройства с величиной яркостной температуры на выходе, оказались отличными от полученных во время наземной калибровки и непостоянными во времени.

При проведении летных испытаний необходимо было обеспечить максимально частую интеркалибровку для установления суточного и межсуточного хода АФ в различных диапазонах измеряемых ЯТ. Ранее разработанная методика (см. Раздел 3.1, [53]) по схеме Geo-Leo не позволяет проводить интеркалибровку чаще, чем два раза в сутки, а этого недостаточно для установления суточного хода АФ или факта его отсутствия.

В связи с этим было решено использовать схему интеркалибровки Geo-Geo, когда поверяемый и эталонный приборы находятся на геостационарной орбите. В качестве эталонного прибора был выбран SEVIRI – радиометр ближайшего в 2016 г. к Электро-Л №2 европейского геостационарного КА Meteosat-10 с точкой стояния на гринвичском меридиане.

Основным фактором неопределенности при проведении интеркалибровки двух геостационарных спутников является так называемый облачный

параллакс [58]: разное положение облака на поверхности Земли в зависимости от его высоты и позиции спутника. При попадании в поле зрения спутникового радиометра облака, координаты соответствующего пикселя определяются координатами точки пересечения земной поверхности лучом, начинающимся из спутника и проходящим через облако, т.е. соответствующий пиксель смещен относительно подоблачной точки (Рисунок 3.5). Кроме того, так как SEVIRI и MSU-GS наблюдают район интеркалибровки с противоположенных направлений, то пиксель, облачный для SEVIRI, может одновременно являться безоблачным для МСУ-ГС, и наоборот.

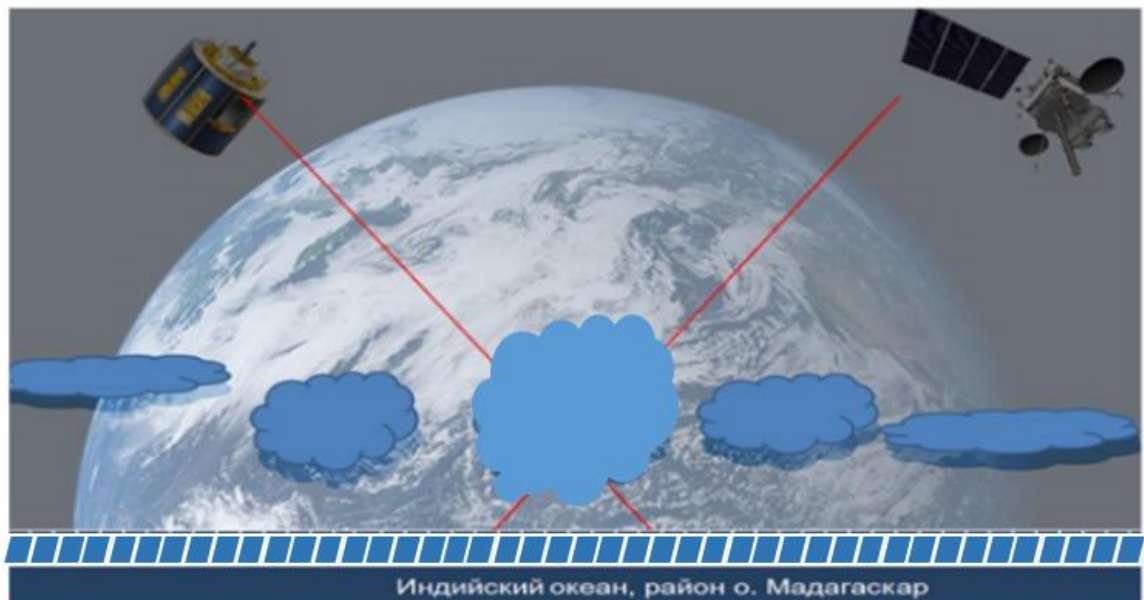


Рисунок 3.5 - Регистрируемое кучевое облако в зависимости от положения КА

Следует отметить, что из-за облачного параллакса работ, посвященных вопросам интеркалибровки по схеме Geo-Geo существенно меньше, чем работ по интеркалибровке Geo-Leo [59, 60, 61]. Удалось найти только две работы [62, 63], в которых описываются интеркалибровки по схеме Geo-Geo радиометров однотипных КА: соответственно японских серии Himawari и американских серии GOES.

При проведении интеркалибровок Himawari -8 и -9 [62] оба спутника фактически стояли в одной и той же точке. В связи с этим расстояние между точками на земной поверхности, соответствующим облаку для обоих спутников, намного меньше линейных размеров пикселя АНІ (2 км в надире).

Таким образом, облако вне зависимости от его высоты будет отнесено к одному и тому же пикселю для обоих радиометров и не вызовет дополнительных ошибок в интеркалибровке.

При интеркалибровке радиометров Imager КА GOES-15 с GOES-13 и с GOES-11 [63] расстояние между подспутниковыми точками по долготе соответственно составило $14,5^\circ$ и $45,5^\circ$. Такое удаление может вызвать отнесение наблюдаемого высокого облака к различным пикселям пространственной сетки, при этом в случае для высоких облаков разница в измеряемых значениях может достигать 100К и более. Для уменьшения количества таких ситуаций авторами проводилось усреднение измеренных интенсивностей уходящего излучения на площади 10×10 пикселей. Сравнение вычисленных яркостных температур осуществлялось для сцен размером примерно $50 \times 50 \text{ км}^2$. При таком усреднении существенно уменьшается динамический диапазон сравниваемых температур, т.к. излучение от холодных вершин высоких облаков смешивается с излучением, идущим от теплых облаков нижних ярусов и подстилающей поверхности. Например, для 4-го (10.8 мкм) канала Imager практически не было сравниваемых яркостных температур менее 230К [63].

Описанные выше обе методики Geo-Geo не могут быть полностью применимы к интеркалибровке МСУ-ГС КА Электро-Л №2. Во-первых, расстояние между геостационарными КА Электро-Л (76° в. д.) и Meteosat-10 (0° в. д.) составляет 76° , поэтому попиксельное сравнение, как в [62], проводить невозможно из-за больших неопределенностей в координатной привязке облачных пикселей. Во-вторых, усреднение измерений по большим площадям, как в [63], не позволит провести интеркалибровку МСУ-ГС в области низких температур (менее 220К).

Интеркалибровка выполняется для совпадающих по времени сеансов сканирования обоих приборов. В отличие от SEVIRI, периодичность сканирования которого составляет 15 минут, МСУ-ГС сканирует видимый

земной диск раз в 30 минут, поэтому всего за сутки получается максимум 48 сеансов интеркалибровки.

Измеренная интенсивность излучения интерполируется в узлы широтно-долготной сетки, центрированной относительно подспутниковой точки на поверхности земного геоида с неравномерным шагом, индивидуальном для каждого КА. Координаты ячеек сетки рассчитываются заранее, исходя из размеров пикселя в надире (в ИК каналах SEVIRI - 3 км, МСУ-ГС - 4 км). Для SEVIRI количество ячеек сетки составляет 3712×3712 , для МСУ-ГС – 2784×2784 . При проведении интеркалибровки и сопоставлении изображений измерения SEVIRI приводятся к широтно-долготной сетке МСУ-ГС, обладающей более грубым разрешением.

Радиометры SEVIRI и МСУ-ГС имеют аналогичные спектральные каналы. Их характеристики представлены в Таблице 3.2 [32].

Таблица 3.2 Спектральные характеристики каналов МСУ-ГС и SEVIRI

Номер и центр (мкм) канала	Спектральный диапазон, мкм	Номер и центр (мкм) канала	Спектральный диапазон, мкм
МСУ-ГС		SEVIRI	
4 (3.8)	3,5–4,01	4 (3.9)	3,48-4,36
5 (6.3)	5,7–7,0	5 (6.2)	5,35-7,15
6 (8.0)	7,5-8,5	6 (7.3)	6,85-7,85
7 (8.7)	8,2-9,2	7 (8.7)	8,30-9,1
8 (9.7)	9,2–10,2	8 (9.7)	9,38-9,94
9 (10.7)	10,2-11,2	9 (10.8)	9,80-11,80
10 (11.8)	11,2-12,5	10 (12.0)	11,00-13,00

Обработка методики интеркалибровки осуществлялась по данным измерений девятих каналов радиометров, расположенных в ИК окне прозрачности атмосферы 10-12 мкм. Из-за нештатной работы МСУ-ГС данные предполетной калибровки использовались только как ориентировочные, влияние различий в спектральных функциях каналов МСУ-ГС и SEVIRI не учитывалось.

Район интеркалибровки находится посередине между КА Электро-Л и Meteosat-10 вблизи долготы 38 ± 3 градуса в. д. По широте район ограничен ± 43 градусами с.ш. и ю. ш. Расположение КА и районов интеркалибровки показано на рисунке 3.6.

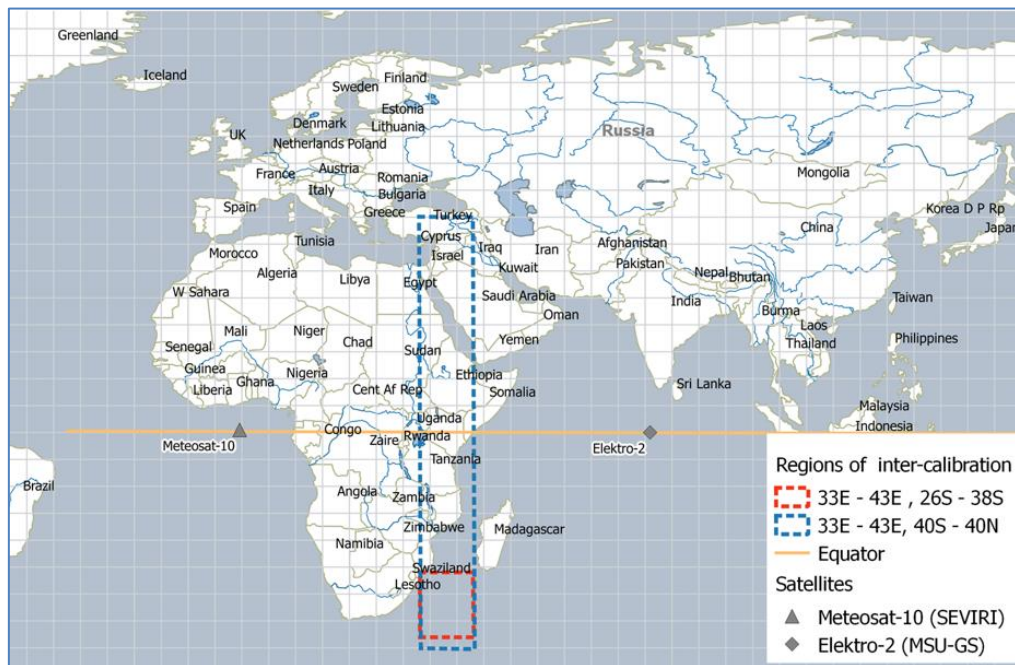


Рисунок 3.6 – Районы интеркалибровки МСУ-ГС КА Электро- Л №2 и SEVIRI КА Meteosat-10

Для интеркалибровки в области высоких температур ($280 \div 300\text{K}$) из этого района была выделена часть акватории Индийского океана юго-западнее острова Мадагаскар (между 26 и 38 градусами ю. ш.), на которой отсутствуют какие-либо участки суши – красный прямоугольник на рисунке 3.6.

При проведении интеркалибровки необходимо установить однозначное соответствие между фрагментами изображений, получаемыми обоими приборами. Как отмечалось выше, предварительно изображение, получаемое с SEVIRI, было пересчитано на широтно-долготную сетку МСУ-ГС. Для удобства анализа в районе интеркалибровки были отобраны ячейки сетки, образующие прямоугольную матрицу, где столбцы матрицы примерно располагаются по меридианам, а строки – по параллелям. Между ± 43 градусами по широте в матрице получилось 135 столбцов и 1920 строк. Разница между минимальной и максимальной долготой пикселей одного столбца находится в пределах от 0 до 1,3 градуса, разница между минимальной

и максимальной широтой одной строки меньше 0,02 градусов. В аналогичной матрице для района Мадагаскара получилось 200 строк [64].

Статистическая надежность интеркалибровки обеспечивается одновременным наблюдением с обоих КА в достаточном количестве одних и тех же пространственно-однородных фрагментов различных атмосферных сцен. В области низких температур (200-220K) такими сценами являются облака глубокой конвекции (Cb или Cu cong) с плоской вершиной (так называемой, наковальной), достигающей тропопаузы. В области высоких (290-300K) – участки поверхности экваториального океана, над которыми нет облаков. Интеркалибровка в области промежуточных температур проводится по слоистым облакам первого (stratus, St) и второго (altostratus, As) ярусов.

Отбор однородных фрагментов изображений осуществляется по среднеквадратичному отклонению ЯТ пикселей от среднего значения 9 элементов матрицы (3×3), центрированной относительно пикселя с индексами {i, j}. Непосредственно используется условие:

$$\sqrt{\frac{\sum_{k=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 (T_{i+k, j+n} - m_{i,j})^2}{9-1}} < \sigma_h \quad (3.5)$$

где $m_{i,j}$ - температура, усредненная по 9 пикселям;

σ_h – пороговое значение СКО, которое выбирается отдельно для МСУ-ГС и SEVIRI. Для МСУ-ГС $\sigma_h = 2K$, для SEVIRI $\sigma_h = 3,4K$. Выбор таких значений обеспечивает примерное равенство (в пределах $\pm 2\%$) количества однородных фрагментов в изображениях района интеркалибровки для обоих приборов. Завышенное в 1,7 раза σ_h SEVIRI по сравнению с МСУ-ГС компенсирует эффект лучшего пространственного разрешения европейского прибора [64].

Для уточнения АФ в области температур менее 260K необходимо установить взаимно однозначное соответствие между яркостными температурами облачных сцен. Расстояние между пикселями высоких облаков может достигать 30-40 км. В связи с этим в сравниваемые пары для каждой строки матрицы с номером i отбираются минимальные $m_{i,jM}$ и $m_{i,jS}$, усредненные по 3×3 пикселям. Индексом jM указан номер пикселя с

минимальной температурой на изображении МСУ-ГС, а индексом jS – на изображении SEVIRI. Для устранения возможных грубых ошибок (из-за краевых эффектов на границах района интеркалибровки, возможного затенения низких облаков высокими и т.п.) осуществляется проверка соответствия индексов пикселей jM и jS диапазонам номеров $jM \pm 2$ и $jS \pm 2$ в которые должна попасть наблюдаемые фрагменты с яркостными температурами $m_{i,jM}$ и $m_{i,jS}$. Средины разрешенных диапазонов jM и jS вычисляются по проекции фрагмента с высотой H по лучу визирования с каждого спутника. Высота H оценивается по приближенной зависимости

$$H = (\max(T_i) - m_{i,jS})/K_T, \quad (3.6)$$

где $\max(T_i)$ – максимальная ЯТ по измерениям SEVIRI в i -ой строке матрицы, $K_T = 6,5$ К/км – средний температурный градиент в тропосфере [65].

Таким образом, для каждого сеанса калибровки получается два одинаковых по длине столбца с минимальными для каждой строки яркостными температурами, измеренными МСУ-ГС и SEVIRI [64].

Для уточнения АФ в области температур выше 275К используется анализ максимумов яркостных температур однородных сцен (с пороговым значением СКО $\sigma_h = 0,5$ К) к юго-западу от о. Мадагаскар. Максимальные температуры T_{max} наблюдаются при попадании в поле зрения радиометров океанической поверхности, свободной от облаков. Температуры упорядочиваются в порядке возрастания. На отрезке $[T_{max}-5, T_{max}]$ для каждого радиометра находится медианное значение ЯТ T_{max}^{SEV} и T_{max}^{MSU} . Разность между T_{max}^{SEV} – T_{max}^{MSU} принимается за калибровочную поправку T_{max} .

В качестве регрессионной кривой, связывающей яркостные температуры SEVIRI и МСУ-ГС, используется зависимость

$$T_{SEV}(T_{MSU}) = a + b \cdot T_{MSU} + c \cdot \exp\left(-\frac{T_{MSU}}{KT}\right), \quad (3.7)$$

где a , b , c – постоянные коэффициенты, которые находятся методом наименьших квадратов; $KT = 30$ К – постоянный коэффициент, полученный эмпирическим путем.

Регрессионная кривая строится на отрезке T_{min}, T_{max} . Здесь T_{min} , получаемая на основе измерений облачных сцен, определяется наличием более 7% однородных сцен с ЯТ МСУ-ГС меньше T_{min} . Экстраполяция в область низких значений не проводится. Для T_{MSU} больше, чем T_{max} яркостная температура находится из соотношения:

$$T_{SEV}(T_{MSU}) = T_{MSU} + (T_{max}^{SEV} - T_{max}^{MSU}) \quad (3.8)$$

Примеры калибровочных кривых, полученных 27 апреля (а) и 7 мая (б) 2018 года в 14:30 UTC, приведены на рисунке 3.7. Звездочкой показано положение точки T_{max}^{MSU} для Мадагаскара. Черными пунктирными линиями выделены границы 95-процентного интервала доверительной вероятности.

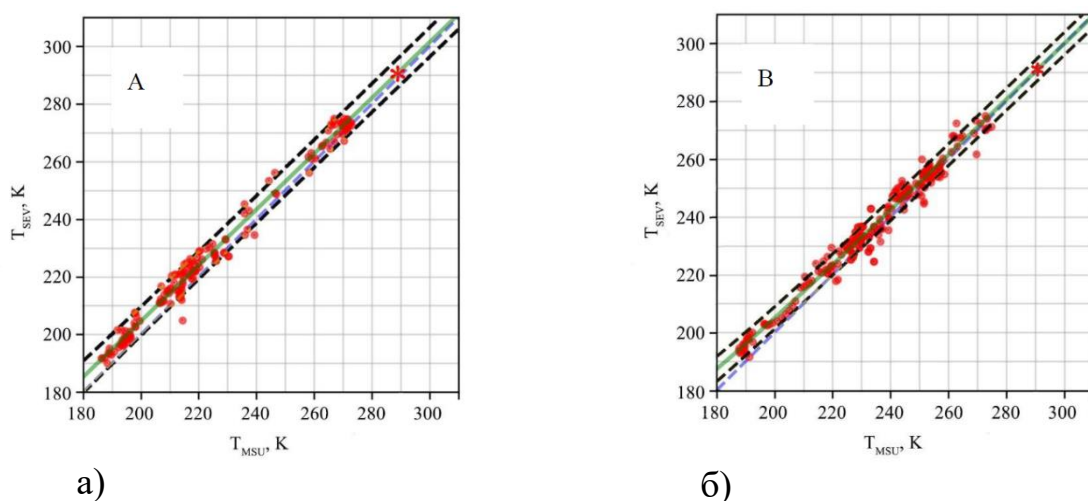


Рисунок 3.7 – Примеры регрессий $T_{SEV}(T_{MSU})$, 2018:
а – 27 апреля, 14:00 UTC; б – 7 мая, 14:30 UTC

По регрессиям $T_{SEV}(T_{MSU})$, получаемым во время параллельных сеансов съемки МСУ-ГС и SEVIRI, для ЯТ МСУ-ГС больших T_{min} на фиксированной сетке значений рассчитывались калибровочные смещения:

$$\Delta T = T_{МСУ} - T_{SEV}(T_{МСУ}) \quad (3.9)$$

Годовой ход смещений ΔT на примере трех яркостных температур, измеряемых МСУ-ГС в 9-ом канале, показан на рисунке 3.8. Он основан на обработке статистически обеспеченных регрессий, полученных с мая 2017 до конца апреля 2018 года (порядковый номер дня отсчитывается от 20 мая 2017 года, когда началась стабильная работа МСУ-ГС).

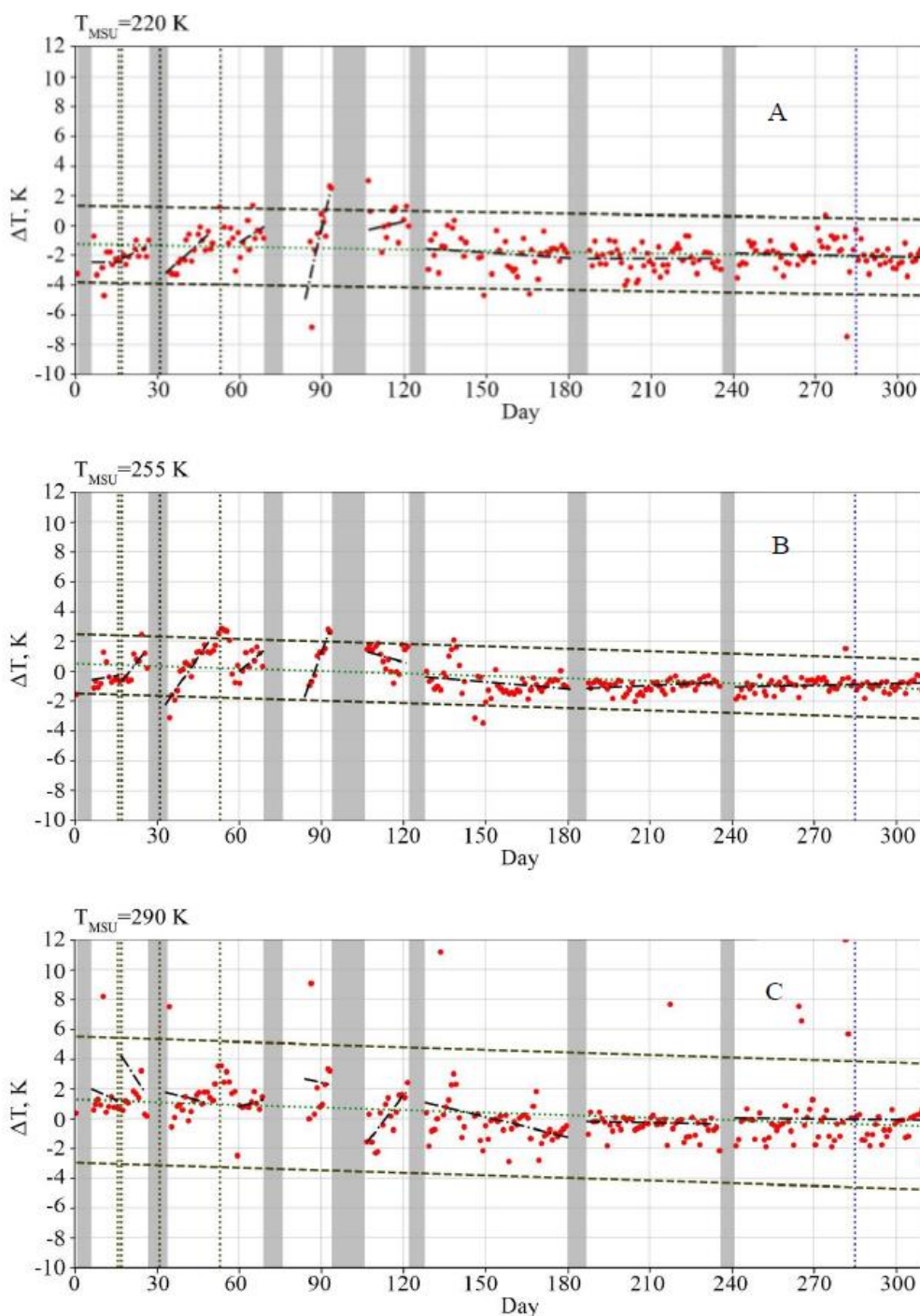


Рисунок 3.8 – Годовой ход калибровочных смещений для трех яркостных температур в 9-ом канале МСУ-ГС: А - 220 К; В - 255 К; С - 290 К

Смещения (красные точки) показаны относительно регрессий (черные штрихпунктирные отрезки прямых), полученных для каждого периода измерений МСУ-ГС между двумя последовательными очистками радиационного холодильника. Периоды удаления криоосадков с входных окон ИК датчиков МСУ-ГС показаны серыми вертикальными полосами. Серыми

вертикальными пунктирными линиями отмечены дни (16, 17 и 53), когда происходила коррекция положения спутника на орбите.

Во время проведения измерений МСУ-ГС между двумя последовательными циклами удаления криоосадков наблюдается линейная регрессионная зависимость смещения калибровки в зависимости от номера дня (черные отрезки), на которую оказывает влияние включение корректирующих двигателей Электро-Л №2. Диапазон изменчивости смещения калибровки за один период нормальной работы существенно больше, чем ее годовая изменчивость, показанная на рисунке 3.8 зеленой прямой, состоящей из точек. Начиная с ноября 2017 года произошла стабилизация работы МСУ-ГС (практически нет разрывов в линиях регрессий, полученных для различных периодов работы прибора). Это подтверждается данными последующих калибровок до мая 2018 г. Разворот космического корабля на 180 градусов в день весеннего равноденствия (вертикальная синяя линия, 282 день), чтобы избежать нагрева радиационного холодильника Солнцем, не нарушил эту тенденцию [64].

В конце февраля 2018 года Eumetsat прекратил передачу данных с SEVIRI/Meteosat-10, заменив их на однотипные данные Meteosat-11. Проведенная проверка калибровки SEVIRI/Meteosat-11 по данным российского фурье-спектрометра ИКФС-2 показала, что в 9 канале разница в яркостных температурах по сравнению с SEVIRI/Meteosat-10, использовавшимся ранее, не превышает 0,1К. Как следует из графиков на рисунке 3.8, замена эталонных приборов практически не отразилась на стабильности временного хода калибровочных поправок к измерениям МСУ-ГС.

Суточный ход калибровочных смещений в 9-ом канале МСУ-ГС, усредненный в течение периода декабрь 2017 – апрель 2018, показан на рисунке 3.9 для тех же яркостных температур, что и на рисунке 3.8. Для выявления суточного хода из данных устранено систематическое смещение, вызванное накоплением криоосадков во время проведения измерений.

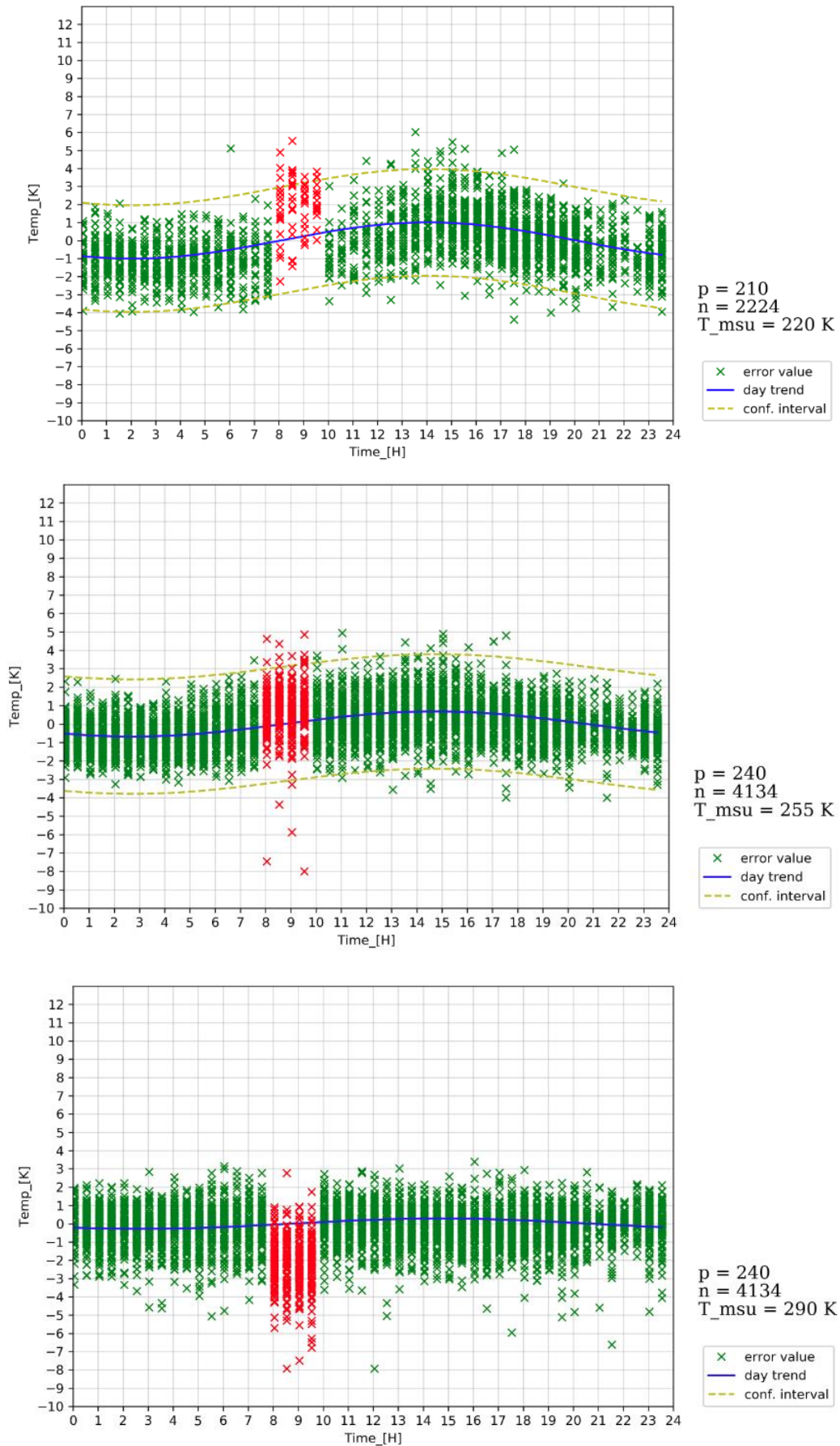


Рисунок 3.9 – Усредненный (декабрь 2017 – апрель 2018) суточный ход калибровочных смещений в 9 канале МСУ-ГС для трех (А - 210 К; В - 255 К; С - 290К) яркостных температур

Анализ кривых показывает, что амплитуда среднего смещения (синяя кривая) не превышает 0,2К для высоких температур и плавно увеличивается до 1К в области низких. Для сравнения на рисунке показаны яркостные температуры МСУ-ГС для 4 сеансов в районе 5,5-7 часов UTC (отмечены красными треугольниками и не подвергались статистической обработке) при вычислениях которых использовалась предполетная АФ.

Адекватность разработанной методики проверялась с использованием измерений фурье-спектрометра ИКФС-2. Данные для сравнения отбирались в течение марта-апреля 2018 г. в районе с центром в подспутниковой точке Электро-Л №2. Для отбора однородных атмосферных сцен (сплошная облачность или отсутствие облаков) СКО яркостных температур пикселей 9-го канала МСУ-ГС, попадающих в поле зрения центральных пикселей ИКФС-2, не превышало 3К. Для схемы Geo-Geo измеренные МСУ-ГС яркостные температуры пересчитывались в измерения SEVIRI, используя полученные калибровочные зависимости. Для схемы Geo-Leo измеренный ИКФС-2 спектр уходящего излучения сворачивался с САФ канала 10.8 мкм SEVIRI.

Обе оценки $T_{SEV}(T_{MSU})$ и $T_{SEV}(T_{ИКФС-2})$ хорошо согласуются во всем рассматриваемом интервале температур (Рисунок 3.10). Коэффициент корреляции $R=0,9$, среднее значение и стандартное отклонение смещения между оценками равны $0,2\pm0,14К$.

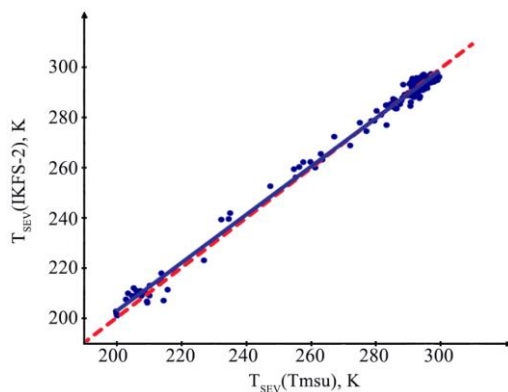


Рисунок 3.10 – Сравнение оценок ЯТ SEVIRI по схеме Geo-Geo и Geo-Leo

Хорошее совпадение калибровочных зависимостей, представленных на рисунке 3.10 подтверждает, с одной стороны, правильность разработанной

методики интеркалибровки по схеме Geo-Geo и ее применимость в широком диапазоне измеряемых температур. С другой стороны, отсутствие существенного суточного хода в ошибках измерениях МСУ-ГС позволяет использовать интеркалибровку по схеме Geo-Leo как для отслеживания изменчивости калибровки 9-го канала МСУ-ГС, так и для калибровки его других каналов (Рисунок 3.11).

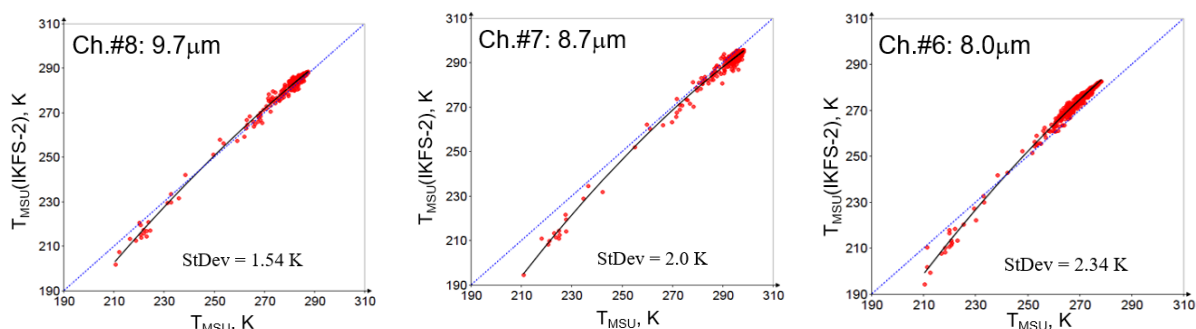


Рисунок 3.11 - Интеркалибровка 8, 7 и 6 каналов МСУ-ГС по измерениям ИКФС-2

3.3 Способ оценки реального пространственного разрешения ИК каналов радиометра МСУ-ГС

КА Электро-Л №3 был запущен 24 декабря 2019 года в точку 165,8° в. д. В период летных испытаний интеркалибровку ИК каналов МСУ-ГС предполагалось проводить по разработанной методике (см. раздел 3.2) с использованием радиометров соседних геостационарных КА. В Таблице 3.3 приведена сравнительная характеристика ИК каналов радиометров МСУ-ГС, АНИ и АМИ, установленных на китайском и корейском геостационарных КА Himawari-8 и GeoKompSat-2A соответственно.

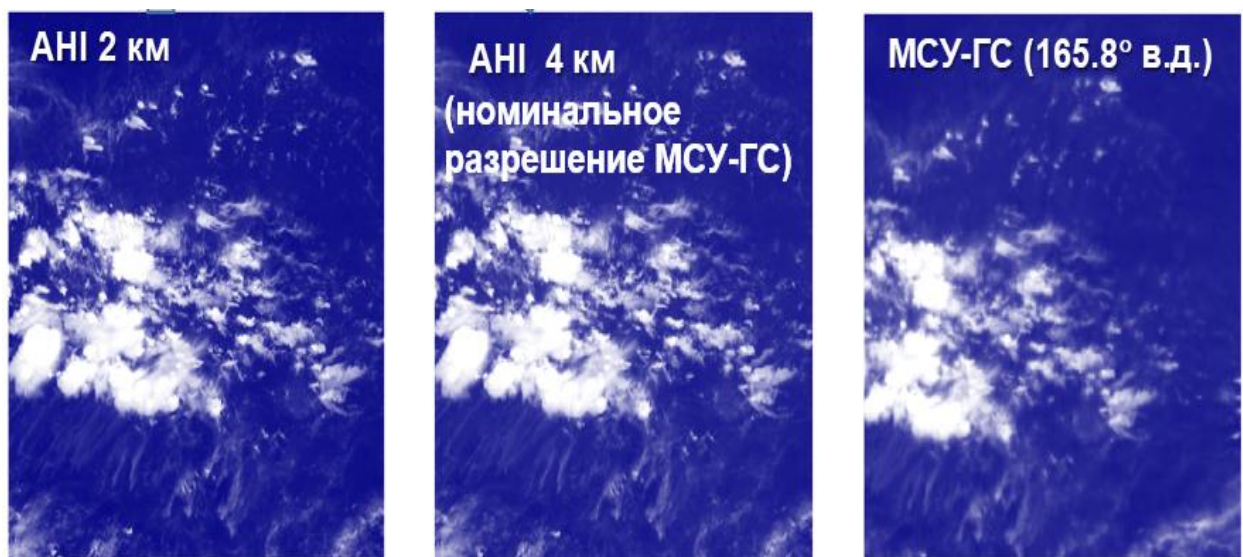
Таблица 3.3 Сравнительная характеристика ИК каналов МСУ-ГС, АНИ и АМИ

Номер канала	Спектральный интервал, мкм	Номер канала	Спектральный интервал, мкм
АНИ/Himawari-8 (140,7 ° в.д.) АМИ/Geo-KompSat-2A (128,2° в.д.)		МСУ-ГС/Электро-Л	
7	3,58 – 4,11	4	3,5–4,01
8	5,43 – 7,04	5	5,7–7,0
9	6,47 – 7,44	6	7,5-8,5
10	6,98 – 7,71		

11	8,12 – 9,08	7	8,2-9,2
12	9,18 – 10,10	8	9,2-10,2
13	9,90 – 10,97	9	10,2-11,2
14	10,30 – 12,18		
15	11,17 – 13,67	10	11,2-12,5

Для проведения интеркалибровки пиксели в ИК канале 10,4 мкм АНІ, имеющие линейный размер в подспутниковой точке 2 км, усреднением приводятся к номинальному линейному размеру 4 км пикселей в канале 10,7 мкм МСУ-ГС.

На рисунке 3.12 а) приведено изображение в канале АНІ с номинальным линейным размером пикселя 2 км. Сравнивая рисунки 3.12 б) и в) видно, что облачность на изображениях МСУ-ГС является более размытой, чем на приведенном к его пространственному разрешению изображении АНІ.



а)

б)

в)

Рисунок 3.12 - Синхронные изображения в каналах 10,4 АНІ (а -номинальное разрешение АНІ 2 км, б – усреднение до разрешения 4 км) и 10,7 МСУ-ГС (в – 4 км)

Чтобы оценить реальное пространственное разрешение в ИК канале МСУ-ГС, изображение АНІ расфокусировалось в соответствии с заданной квадратной матрицей размером 5×5 пикселей. Элементы матрицы рассчитываются с использованием функции Гаусса $G(\sigma)$, где σ - параметр расфокусировки. Для вычисления самого элемента матрицы используется формула:

$$M_{k,n} = G_n^k(\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * \exp\left[-\left(\frac{n^2+k^2}{2\sigma^2}\right)\right], \quad (3.10)$$

где n, k меняются в пределах от -5 до +5.

В качестве критерия сходства изображений МСУ-ГС и АНІ предложено использовать количество границ облаков, выделенных пороговым методом по модулю разности яркостных температур BT в двух близлежащих пикселях [66]:

$$\left| BT_{i,j} - BT_{i+1,j} \right| > BT_h, \quad (3.11)$$

или

$$\left| BT_{i,j} - BT_{i,j+1} \right| > BT_h,$$

где $BT_h = 10$ К.

Параметр расфокусировки σ выбирается при условии минимизации критерия:

$$F(\sigma) = \sqrt{\left(\frac{NxH}{NxH} - 1\right)^2 + \left(\frac{NyH}{NyH} - 1\right)^2} = \min, \quad (3.12)$$

где NxE и NyE - нормированное количество пар пикселей (выделенных границ облаков) на изображении в ИК канале МСУ-ГС; NxH и NyH - количество пар пикселей расфокусированного изображения в аналогичном ИК канале АНІ, удовлетворяющих пороговому критерию $BT_h = 10$ К, и нормированное на общее количество пикселей в выбранном регионе.

Реальное пространственное разрешение, т.е. эффективный диаметр пикселя в ИК канале МСУ-ГС находится усреднением по площади изображения, где верхний предел интегрирования $L \approx 20$ км:

$$D_{eff} = 2 * \frac{\int_0^L R^2 G(\sigma) dR}{\int_0^L G(\sigma) R dR} \quad (3.13)$$

Валидация методики определения реального пространственного разрешения проводилась путем сравнения разрешения пикселей АМІ и АНІ.

На рисунке 3.13 показана номограмма параметра расфокусировки σ , критерия $F(\sigma)$ и эффективного диаметра D_{eff} для каналов 10.4 мкм, 11.6 мкм и 3.8 мкм при использовании АНІ в качестве эталона.

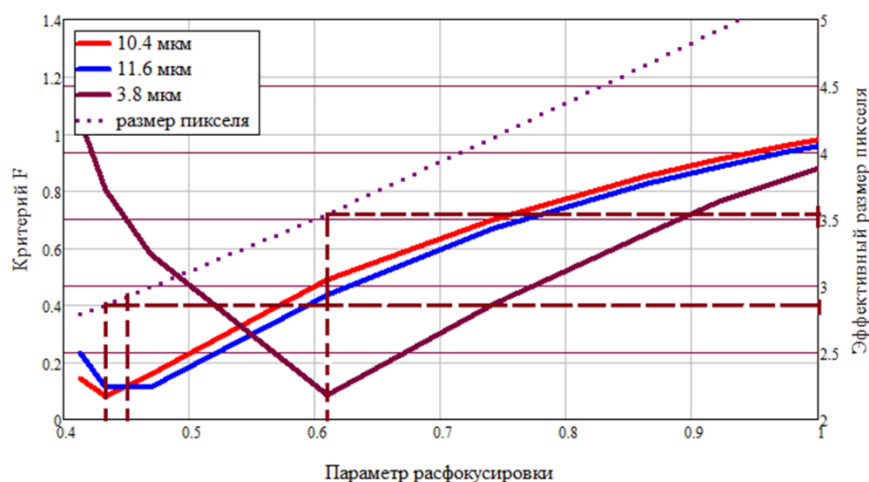


Рисунок 3.13 – Номограмма для определения эффективного диаметра пикселя АМІ по АНІ

Для АМІ эффективный размер пикселя превышает номинальный примерно на 40% в районе 10 мкм и на 80% в районе 4 мкм. При использовании АМІ в качестве эталона минимум критерия $F(\sigma)$ отсутствует. Целевые функции для всех каналов монотонно увеличиваются с увеличением значения параметра расфокусировки.

Результаты оценки реального пространственного разрешения радиометра АМІ/GK-2A по АНІ /Himawari-8 представлены на рисунке 3.14.

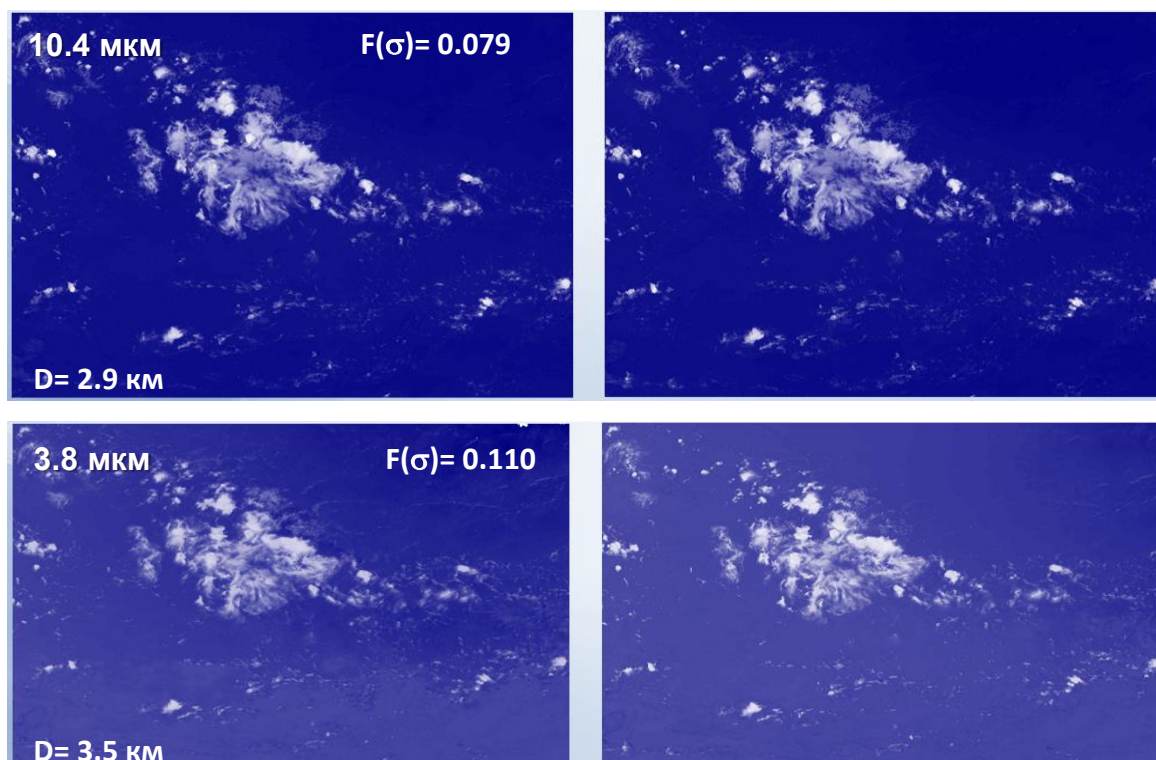


Рисунок 3.14 – Результаты оценки реального пространственного разрешения радиометра АМІ/GK-2A по АНІ /Himawari-8 (02:00 UTC, 31 мая 2020 г.)

На рисунке 3.15 представлена оценка пространственного разрешения в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №3. На конец мая эффективный размер пикселя составлял порядка 8 км.

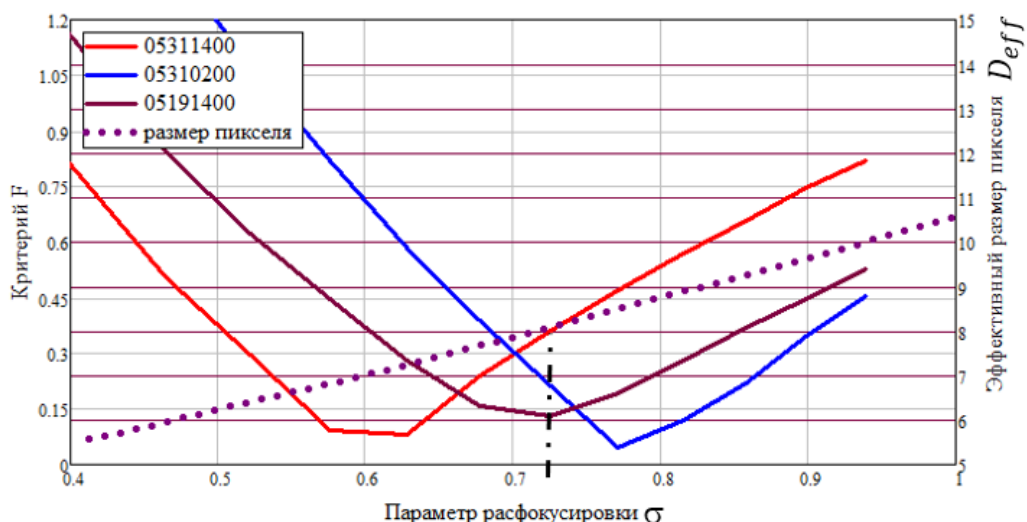


Рисунок 3.15 – Оценка пространственного разрешения в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №3

Валидация оценки пространственного разрешения проводилась на основе сопоставления изображений в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №2 (в т. с. 76° в. д.) и радиометра SEVIRI КА Meteosat-11 (т. с. 0° в. д.). Она составила 5,7 км и примерно совпала с ранее сделанной независимой оценкой при разработке алгоритма интеркалибровки канала по измерениям радиометра SEVIRI европейского геостационарного КА Meteosat-10 (Рисунок 3.16).

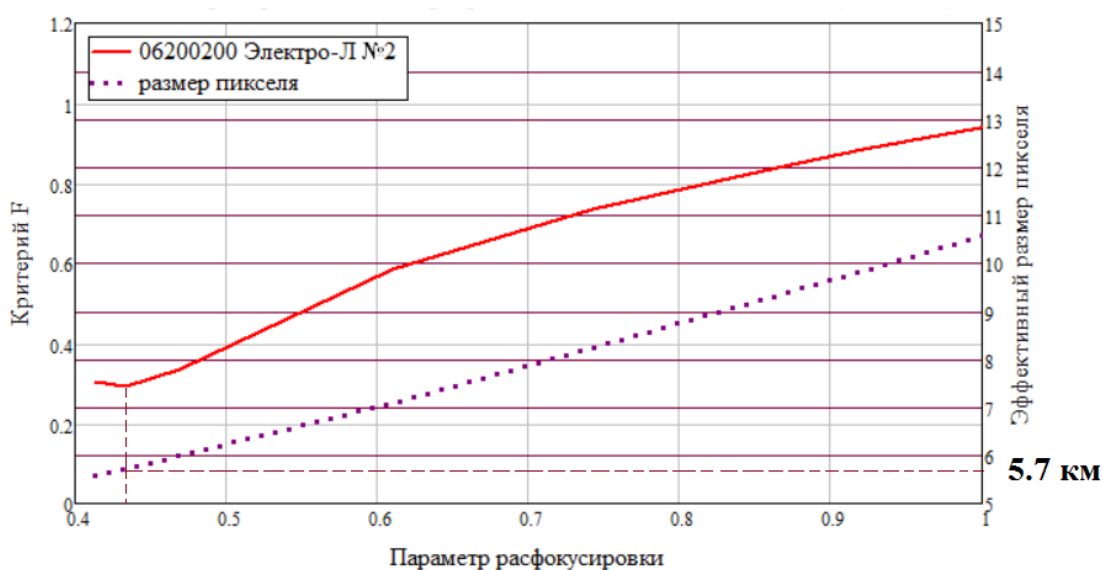


Рисунок 3.16 – Оценка пространственного разрешения в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №2 (т. с. 76° в. д.)

По результатам работ разработчиками аппаратуры МСУ-ГС осуществлена коррекция программно-математического обеспечения первичной обработки данных, после которого пространственное разрешение в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №3 стало ~5,4 км.

После летных испытаний КА Электро-Л №3 был переведен в точку стояния 76° в. д. Интеркалибровка ИК каналов осуществлялась ранее разработанной методике Geo-Geo, но уже с использованием измерений радиометра АМІ на корейском геостационарном КА GeoKompSat-2A ($128,2^\circ$ в. д.). Результаты интеркалибровки 9 и 10 каналов, а также оценка реального пространственного разрешения представлены на рисунках 3.17 – 3.20.

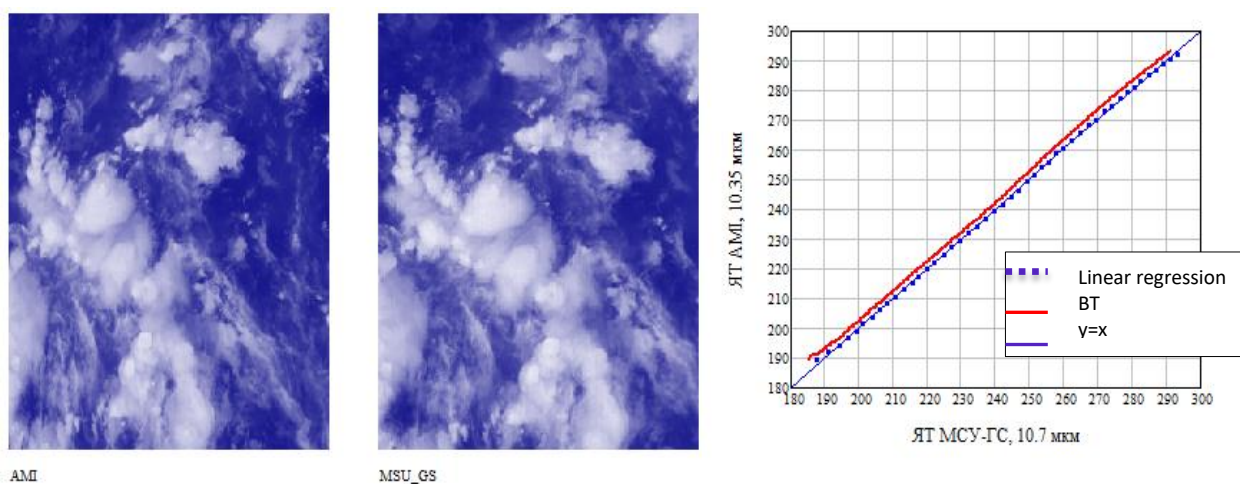


Рисунок 3.17 - Оценка реального пространственного разрешения пикселя 9-го канала МСУ-ГС ($D_{\text{eff}}=5,4$ км, $F(\sigma)=0,7806$) и калибровочная кривая 2021-05-05, UTC 00:00. $T_{\text{АМІ}} = 1,726 + 1,004 \times T_{\text{МСУ}}$

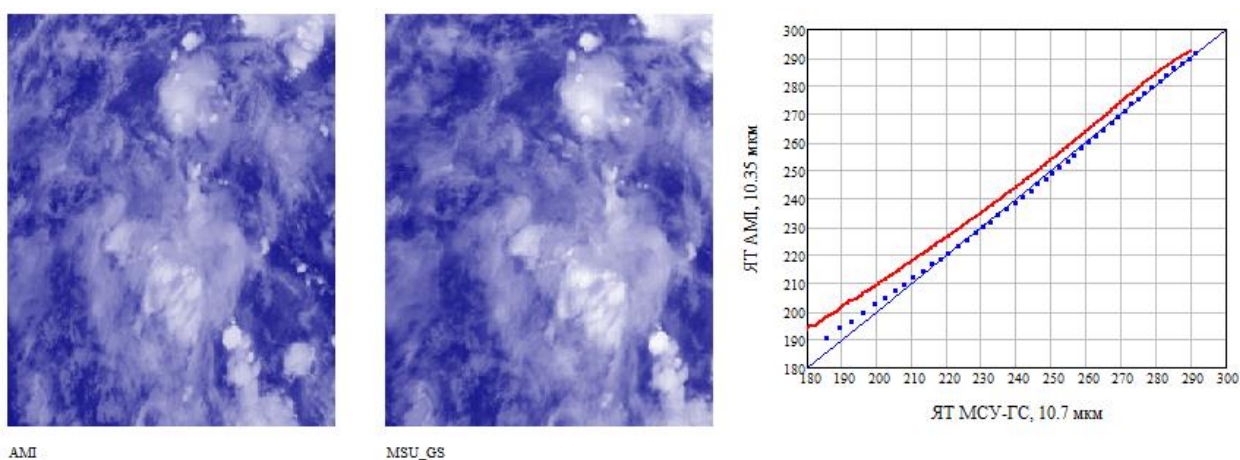


Рисунок 3.18 - Оценка реального пространственного разрешения пикселя 9-го канала МСУ-ГС ($D_{\text{eff}}=5,4$ км, $F(\sigma)=0,857$) и калибровочная кривая 2021-05-05, UTC 20:00. $T_{\text{АМІ}} = 19,215 + 0,943 \times T_{\text{МСУ}}$

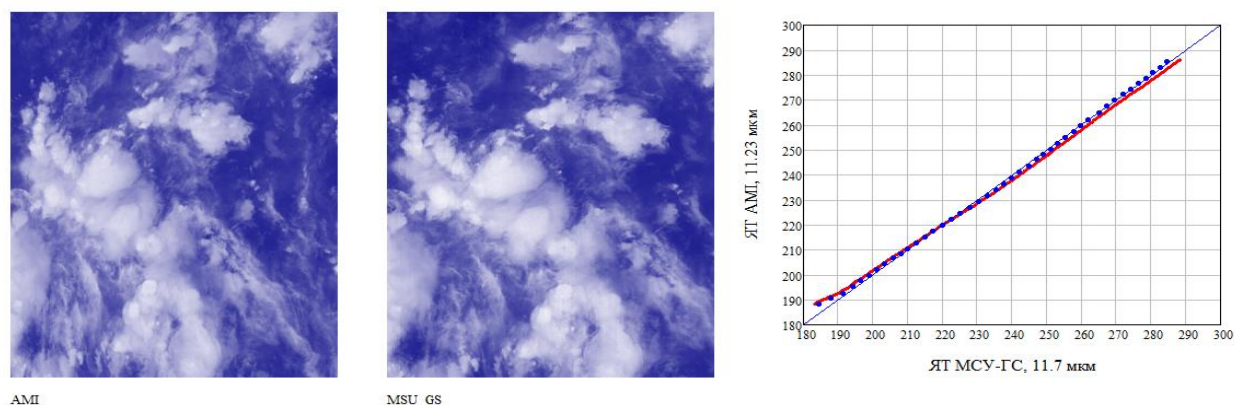


Рисунок 3.19 - Оценка реального пространственного разрешения пикселя 10-го канала МСУ-ГС ($D_{\text{eff}}=5,4$ км, $F(\sigma)=0.523$) и калибровочная кривая 2021-05-05, UTC 00:00. $T_{\text{AMR}}=8,706+0,960 \times T_{\text{МСУ}}$

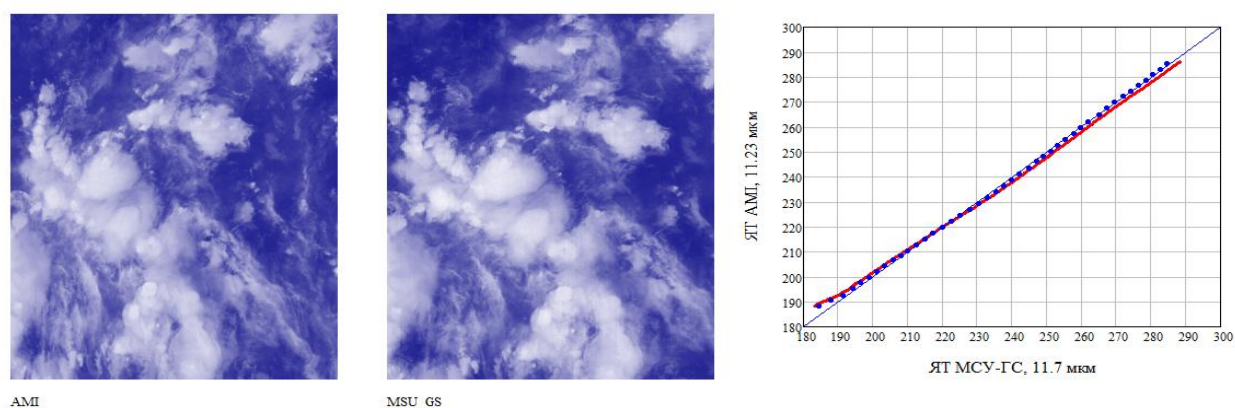


Рисунок 3.20 - Оценка реального пространственного разрешения пикселя 10-го канала МСУ-ГС ($D_{\text{eff}}=5,4$ км, $F(\sigma)=0.523$) и калибровочная кривая 2021-05-05, UTC 20:00. $T_{\text{AMR}}=22,972+0,9125 \times T_{\text{МСУ}}$

По результатам работ выявлен суточный ход в калибровочных зависимостях для 9-го и 10-го каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №3. Его амплитуда в области низких температур ($\sim 220\text{K}$) составляет порядка 4K для канала №9 и 5K для канала №10, в области высоких температур (290K) – не превышает 0,4K для канала №9 и 0,5K для канала №10 [66].

3.4 Оценка полноты решения тематических задач МСУ-ГС КА серии Электро-Л

Согласно классификации ВМО и зарубежных космических агентств спутниковая информационная продукция (ИП) может быть трех типов: основная, дополнительная и возможная [67]. В Таблице 3.4 представлен

разработанный НИЦ «Планета» на основе анализа отечественного и зарубежного опыта использования данных с геостационарных КА перечень ИП, которые можно получать по измерениям МСУ-ГС КА серии Электро-Л.

Таблица 3.4 Перечень информационной продукции

№ п/п	Информационный продукт	Наименование тематической задачи
1	Многоспектральные изображения *	Формирование многоспектральных изображений облачного покрова и поверхности Земли
2	Карты ТПО *	Определение температуры поверхности океана (ТПО)
3	Карты ТПС *	Определение температуры поверхности суши (ТПС)
4	Карты температуры и высоты верхней границы облачности *	Определение температуры и высоты верхней границы облаков
5	Карты балльности и типа облаков **	Определение типа и количества облаков (ночью, днем)
6	Зоны осадков, оценки интенсивности **	Определение интенсивности осадков (жидких и твердых)
7	Поле векторов ветра на трех уровнях *	Определение скорости и направления (векторов) ветра
8	Карты общего содержания озона **	Определение общего содержания озона в атмосфере
Примечание — индекс * относится к основным ИП, индекс** относится к дополнительным ИП		

Помимо перечисленных в Таблице 3.4 могут создаваться следующие дополнительные ИП: карты микрофизические параметры облачного покрова, карты очагов пожаров, карты ледяного и снежного покровов и др.

В соответствии с ГОСТ 15467-79 [68] выбраны следующие показатели качества ИП по данным МСУ-ГС (Таблица 3.5):

Таблица 3.5 Показатели качества ИП по данным МСУ-ГС

Единичный показатель качества продукции	Показатель качества продукции, характеризующий одно из ее свойств
Базовое значение показателя качества продукции	Значение показателя качества продукции, принятое за основу при сравнительной оценке ее качества

Регламентированное значение показателя качества продукции	Значение показателя качества продукции, установленное нормативной документацией
---	---

В [68] говорится о том, что «...Единичные показатели могут относиться как к единице продукции, так и к совокупности единиц однородной продукции, характеризуя одно простое свойство». А также «...В качестве базовых значений могут приниматься значения показателей качества лучших отечественных и зарубежных образцов, по которым имеются достоверные данные об их качестве...».

Применительно к ИП, полученной по данным измерений МСУ-ГС, в качестве единичных показателей качества продукции можно принять основные требования ВМО к спутниковой информационной продукции [11], а в качестве базовых — показатели по каждому ИП, созданному с использованием данных современных аналогичных зарубежных геостационарных радиометров — ABI/GOES-R [69] и SEVIRI/Meteosat. Так как некоторые характеристики МСУ-ГС несколько уступают зарубежным аналогам, то на данный момент достичь всех приведенных в [69] показателей качества не представляет возможным.

Требования ВМО [11] к спутниковой информационной продукции состоят из следующих показателей: горизонтальное и вертикальное разрешение, периодичность или частота получения (наблюдательный цикл) данных, оперативность представления или время задержки между моментами измерений и доставки пользователю, а также погрешность (мера неопределенности — СКО, смещение). Они меняются в зависимости от области применения: наукастинг, численный прогноз погоды, исследования климата и др. При этом есть три градации этих показателей: «goal» — максимальные — идеальные характеристики, превышение которых не требуется, «breakthrough» — оптимальный, «threshold» — минимальные — ниже которых измерения не имеют практической ценности для решаемого круга задач.

В Таблице 3.6 приведены единичные (ВМО, 2-4 столбцы) и базовые (SEVIRI, ABI, система СВПН НИЦ «Планета», последний столбец) требования к нескольким ИП: температура поверхности океана, суши, верхней границы облачности, векторы ветра и общее содержание озона.

Таблица 3.6 Требования к ИП для решения задач оперативного гидрометеорологического обеспечения (максимальные и оптимальные показатели)

Информационный продукт	Разрешение в надире, км	Время получения глобальной информации	Погрешность измерения	Область применения, источник базового значения
Температура поверхности океана	5 / 10 5 / 15 1 км 3 5	3 ч / 6 ч 3 ч / 24 ч 60 мин 15 мин 6 ч	0,5 / 0,8К 0,3 / 0,5К 0,1К 0,46К 0,8К	Наукастинг ЧПП Климат SEVIRI СВПН
Температура поверхности суши	1 / 5 5 / 15 1 2 15	10 мин / 30 мин 30 мин / 3 ч 3 ч 15 мин 30 мин	0,5 / 1К 0,5 / 1К 1К 2,5К 3К	Наукастинг ЧПП Климат ABI СВПН
Температура верхней границы облачности	1 / 5 50 10 15	5 / 15 мин 3 ч 15 мин 30 мин	0,5 / 0,8К 1\К 0,44К 5 К	Наукастинг Климат SEVIRI СВПН
Векторы ветра (горизонтальные компоненты)	5 / 15 15 / 100 10 2 50	15 / 60 мин 60 мин / 6 ч 60 мин 15 мин 60 мин	1 / 2 м/с 1 / 3 м/с 2 м/с 3,8 м/с 4 м/с	Наукастинг ЧПП Климат ABI СВПН
Общее содержание озона	15 / 100 20 10 50	60 мин / 6 ч 4 ч 60 мин 12 ч	5% / 10% 2% 5% 8%	ЧПП Климат ABI СВПН

Для проверки качества ИП, получаемых по данным измерений МСУ-ГС, в качестве эталонных использовались:

- результаты буйковых измерений ТПО (из базы данных ФГБУ «Гидрометцентр России»);
- независимые оценки ТПС по данным SEVIRI КА Meteosat или MODIS КА Terra;
- независимые оценки температуры верхней границы облачности по данным SEVIRI КА Meteosat;

- результаты аэрологического зондирования (из базы данных ФГБУ «Гидрометцентр России»);
- независимые оценки общего содержания озона по данным ОМІ КА Aura.

Приведенные в Таблице 3.6 базовые и единичные показатели качества выражены в разных единицах измерения и имеют широкий диапазон изменений. Для возможности провести общую оценку разноразмерных величин и оценить качество ИП предлагается преобразовать физические шкалы показателей в безразмерную шкалу желательности, отражающую экспертные оценки и не критичную к крайним значениям.

В Таблице 3.7 представлены характеристики шкалы желательности [70], устанавливающей соответствие между нашими субъективными предпочтениями и численными значениями желательности на основе функции Харрингтона [71].

Таблица 3.7 Стандартные отметки на шкале желательности

Желательность	Интервалы значений шкалы желательности
Очень хорошо	1,00 – 0,80
Хорошо	0,80 – 0,63
Удовлетворительно	0,63 – 0,37
Плохо	0,37 – 0,20
Очень плохо	0,20 – 0,00

Функция Харрингтона имеет вид

$$d(v) = \exp(-\exp(-v)), \quad (3.14)$$

где v – кодированное значение целевой функции,

$$v = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3.15)$$

x – ее натуральное значение. В случае с оценкой качества ИП x – это значение выбранного показателя качества из Таблицы 3.6, x_{min} соответствует нижней границе градации «удовлетворительно» ($d(x_{min}) = 0,37$), x_{max} – нижней границе

градации «хорошо» ($d(x_{max}) = 0,63$). График функции Харрингтона показан на рисунке 3.21.

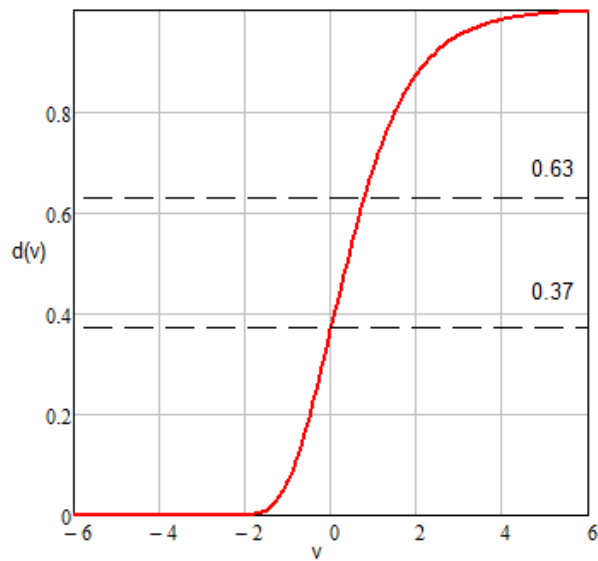


Рисунок 3.21 – Функция Харрингтона

Номинальные значения характеристик ИК каналов МСУ-ГС, SEVIRI и ABI приведены в Таблице 3.8.

Таблица 3.8 Стандартные отметки на шкале желательности

Характеристика ИП	МСУ-ГС	SEVIRI	АНІ
Разрешение в надире	4	3	2
Время получения глобальной информации, мин	30/15	15	10
Погрешность измерения, К	0,2	0,4	0,2

Переход к кодированным значениям аргумента v по формуле (3.14) требует определить x_{max}, x_{min} . В качестве x_{max} используются параметры из Таблицы 3.6 для области наукастинга/численного прогноза погоды или параметры качества ИП радиометра ABI. В качестве x_{min} в основном используются требования по МСУ-ГС или типовое значение, полученное в результате оценок СВПН.

В Таблице 3.9 приведены вычисленные значения $d(v)$ функции Харрингтона для единичных показателей качества ВМО.

Таблица 3.9 Оценка информационных продуктов по шкале желательности

Вид информации или параметр	Характеристика получаемого ИП	Уровни кодирования факторов		МСУ-ГС Эл.-Л №2		МСУ-ГС Эл.-Л №3		SEVIRI		ABI		Максимальный	
		x_{min}	x_{max}	d(z), %	D _i , %	d(z), %	D _i , %	d(z), %	D _i , %	d(z), %	D _i , %	d(z), %	D _i , %
Температура поверхности океана	Разрешение в надире, км	50	5	69	0	69	69	70	72	71	75	71	69
	Время получения глоб. информ., час	6	1	72		73		73		74		69	
	Погрешность измерения, К	1	0,5	0		66		74		82		69	
Температура поверхности суши	Разрешение в надире, км	15	5	69	67	61	57	74	61	76	74	78	73
	Время получения глоб. информ., мин	60	10	58		67		67		69		67	
	Погрешность измерения, К	3	1	46		46		46		78		75	
Температура верхней границы облачности	Разрешение в надире, км	5	1	37	46	12	38	55	63	62	68	69	72
	Время получения глоб. информ., мин	30	10	37		62		62		69		74	
	Погрешность измерения, К	5.0	2	73		73		73		73		73	
Векторы ветра (горизонтальные компоненты)	Разрешение в надире, км	50	10	37	37	37	45	49	50	69	56	72	77
	Время получения глоб. информ., мин	60	30	37		69		69		69		80	
	Погрешность измерения, м/с	4	2	37		37		37		37		80	

Для МСУ-ГС КА Электро-Л №2 период получения глобальной информации соответствует штатной величине 30 минут. Для МСУ-ГС КА Электро-Л №3 используется величина периода учащенной съемки (15 минут), возможность использования которой подтверждена во время летных испытаний.

При проведении интеркалибровки МСУ-ГС КА Электро-Л №2 по радиометру SEVIRI КА Meteosat-10, -11 линейный размер пикселя МСУ-ГС в

ИК канале №9 был оценен примерно в 5 км. Эта величина принята в качестве аргумента для расчета частной функции желательности по пространственному разрешению.

По результатам интеркалибровки МСУ-ГС КА Электро-Л №3 с радиометром АМІ, являющимся полным аналогом радиометра АВІ и созданного тем же самым производителем аппаратуры [72], линейный размер пикселя канала №9 на момент летных испытаний был оценен в ≈ 8 км.

При оценке температуры поверхности океана по данным КА Электро-Л №2 погрешность измерений задана в 3К – СКО, вызванной неопределенностью содержания в атмосфере водяного пара, так как канал № 10, используемый для учета его влияния, был неработоспособен. Для аналогичных задач по данным КА Электро-Л №3 погрешность оценена в 2К из-за полос, наблюдаемых в изображениях. Однако в силу случайного расположения полос, их вклад в погрешность определения температуры океана по нескольким сеансам (например, в течение 3-х часов – 6 сеансов) будет примерно в $\sqrt{13}$ меньше, чем при определении температуры по одному сеансу. Аналогично учитывается уменьшение влияния случайно расположенных полос при определении температуры поверхности суши путем усреднения измерений в пределах часа.

Обобщенная функция желательности Харрингтона по каждому виду информации в Таблице 3.9 рассчитывалась как геометрическое среднее между частными функциями [70, 73, 74]:

$$D_i(z) = \sqrt[n]{\prod_k^n d_k(z)}, \quad (3.16)$$

где $n=3$.

Полученные результаты показывают, что из пяти тематических продуктов МСУ-ГС КА Электро-Л № 3 решает удовлетворительно или хорошо все пять задач. Основные недостатки связаны недостаточным пространственным разрешением, вызванным расфокусировкой ИК каналов, например, при определении высоты верхней границы конвективной облачности, имеющей развитую вертикально геометрическую структуру.

ГЛАВА 4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИК АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

4.1 Оценка совмещения инфракрасных каналов спутниковых радиометров

Совмещение изображений в ИК каналах спутниковых радиометров проверить сложнее, чем в видимых каналах. Основную трудность вносит более низкое, по сравнению с каналами в видимом диапазоне, пространственное разрешение ИК каналов. Интеркалибровка ИК каналов проводится отдельно по каждому каналу радиометра. Поэтому несмотря на ее хорошие результаты, алгоритмы создания информационных продуктов, в которых используется разность ИК каналов, могут не сработать.

Для иллюстрации этого на рисунке 4.1 показаны результаты определения температуры поверхности океана (Sea Surface Temperature, SST) по измерениям МСУ-МР КА Метеор-М №2 и №2-2, а также регрессии ЯТ в ИК каналах №5 и № 6 радиометра МСУ-МР обоих КА, которые были получены в марте 2022 г.

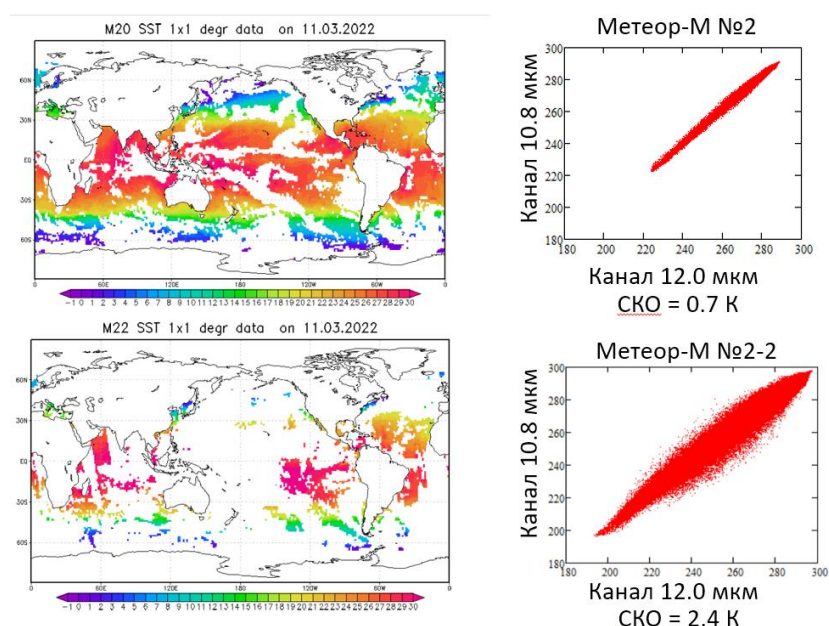


Рисунок 4.1 – СКО яркостных температур в ИК каналах «окна прозрачности атмосферы» МСУ-МР на КА Метеор-М №2 и № 2-2

Большой случайный разброс в ЯТ из-за плохого совмещения полей зрения каналов МСУ-МР КА Метеор-М №2-2 приводил к невыполнению некоторых критериев качества в используемом алгоритме определения SST. [Вследствие этого, как видно на рисунке 4.1, количество оценок SST по данным КА Метеор-М №2-2 было в 5-7 раз меньше чем по данным его предшественника. После улучшения совмещения полей зрения каналов, выполненного разработчиками аппаратуры, СКО температурной регрессии уменьшилось с 2,4К до 0,5К, стало возможно проведение интеркалибровки, благодаря которой количество пикселей, пригодных для определения SST, увеличилось примерно в 8 раз (см. рисунок 2.13), а погрешность оценки SST значительно уменьшилось.

Аналогичные проблемы с совмещением ИК каналов наблюдаются для радиометров МСУ-ГС, устанавливаемых на геостационарные КА серии Электро-Л и высокоэллиптические серии Арктика-М. При формировании изображений ИК каналов МСУ-ГС сигнал с выхода элемента светоприемной матрицы смешивается с сигналами других элементов. Помимо излучения от наблюдаемой атмосферной сцены на амплитуды сигналов влияет большое количество факторов, в итоге приводящих к случайным и структурным искажениям получаемых изображений. Кроме того, для повышения четкости изображения при наземной обработке используется длинная цепочка преобразований [75], многие из которых могут в свою очередь вызывать разброс ЯТ в соседних каналах при измерениях над разорванной облачностью.

Например, при разработке методики общего содержания озона было установлено, что в каналах МСУ-ГС №9 и №8 («озонный» канал) КА Электро-Л №2 для одного и того же пикселя наблюдается разброс измерений (СКО порядка 3-5К) в отличие от аналогичных зарубежных радиометров на геостационарных космических аппаратах: АН/Hiawari-8, Seviri/Meteosat-11 (СКО 0,5-0,7К). У радиометра AGRI/FY-4 нет «озонного» канала, но разброс в каналах окна прозрачности атмосферы также не превышает 0,5К [76]. Это верно и для каналов SEVIRI и АН в окне прозрачности атмосферы (рисунок 4.2).

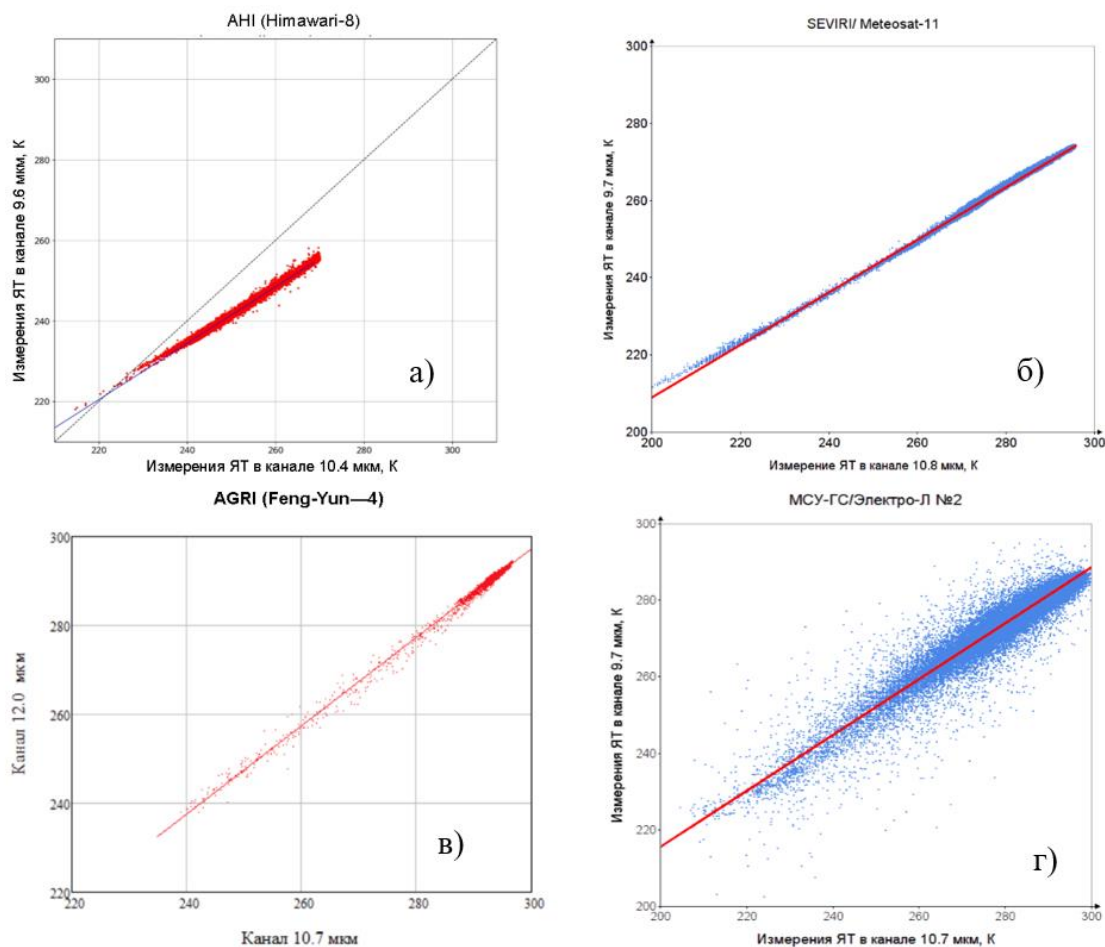


Рисунок 4.2 - Разброс измерений в ИК каналах «окна прозрачности» атмосферы АНІ (а), AGRI (в) и «озонных» каналах SEVIRI (б) и MCSU-ГС (г)

Помимо рассогласованности измерений в ИК каналах MCSU-ГС, другим мешающим фактором является большая ширина спектрального диапазона «озонного» канала №8 радиометра MCSU-ГС, которая примерно в 3 раза превышает ширину инфракрасной полосы поглощения озона в районе 9,6 мкм. После внесения изменений в программы наземной обработки данных разработчиками MCSU-ГС сведение каналов улучшилось: например, СКО между ЯТ каналов №8 и №9 стало около 2К. Однако сужение спектрального диапазона канала №8 будет осуществлено только на новых КА серий Электрон-Л и Арктика-М, поэтому методика определения общего содержания озона в атмосфере отрабатывалась на данных радиометра SEVIRI.

4.2 Определение общего содержания озона по измерениям инфракрасных каналов геостационарных радиометров

Существующие методики определения общего содержания озона по измерениям в ИК каналах геостационарных КА [77, 78, 79, 80, 81, 82] в качестве дополнительной информации используют данные вертикального профиля температуры в качестве предикторов уравнения регрессии и разработаны, в основном, для безоблачных условий.

Новая разработанная методика позволяет определить общее содержание озона при наличии облачности и без использования прогностического профиля. Суть ее заключается в нахождении регрессионной связи между эффективной оптической толщиной атмосферы и количеством озона. Интенсивность излучения в полосе 9,7 мкм, ослабленная слоем озона, приходит на верхнюю границу атмосферы от разных сцен — подстилающей поверхности или облаков — и определяется как:

$$I_S = P(T_S) \exp(-\tau) + \int_0^L P(T_l) \frac{d\tau(l)}{dl} dl \quad (4.1)$$

$$I_{Cl} = P(T_{Cl}) \exp(-\tau) + \int_0^L P(T_l) \frac{d\tau(l)}{dl},$$

где $P(T_S)$, $P(T_{Cl})$ — интенсивность излучения поверхности, облака, рассчитанная по функции Планка, $\int_0^L P(T_l) \frac{d\tau(l)}{dl}$ — собственное излучение атмосферы, $\exp(-\tau)$ — ослабление излучения согласно закону Бугера — Ламберта — Бера. Предполагая постоянство озона в верхних слоях атмосферы в рассматриваемом районе, размеры которого значительно больше размера одного пикселя, из разности $I_S - I_{Cl}$ можно найти эффективную оптическую толщину

$$\tau = -\ln \left[\frac{I_S - I_{Cl}}{P(T_S) - P(T_{Cl})} \right] \quad (4.2)$$

При этом в оценку τ не входит вклад собственного излучения атмосферы.

Для спутниковых измерений $\left\{ \begin{matrix} I_S \\ I_{Cl} \end{matrix} \right\} = I_{9,7}$ — интенсивность излучения, регистрируемая в канале 9,7 мкм, в отдельном безоблачном или облачном пикселе, $\left\{ \begin{matrix} P(T_S) \\ P(T_{Cl}) \end{matrix} \right\} = P_{9,7}^*$ — интенсивность источника (земли или облака) излучения, рассчитанная по формуле Планка для температуры сцены $T_{9,7}^*$.

Отработка методики проводилась на выбранных 15 моделях атмосферы М. Матрикарди [40]. Для них были посчитаны спектры излучения с помощью полинейной модели переноса излучения LBLRTM [38] в диапазоне от 710 до 1210 см⁻¹, коэффициент излучения поверхности равен единице, угол наблюдений КА «в надир».

Общее содержание озона для каждой модели рассчитано по формуле:

$$O3_i = 10^8 * \int_{z0}^{z100} \frac{O3_i(z)}{1+H2O_i(z)} \times \frac{p(z)}{p0} \times \frac{T0}{t_i(z)} dz \quad (4.3)$$

где $O3_i(z)$ – концентрация озона (ppmv), $H2O_i(z)$ – концентрация водяного пара (ppmv), $p(z)$, $t(z)$ – давление и температура соответственно на каждом уровне модели атмосферы, z – высота слоя атмосферы в км, i – номер модели.

Интенсивность излучения в ИК-каналах спутниковой аппаратуры вычислялась путем свертки моделированного спектра излучения атмосферы со спектрально-аппаратными функциями соответствующих каналов 9.7 мкм и 10.8 мкм:

$$I_{ск} = \frac{1}{N} \times \int_{\nu1}^{\nu2} I_i \times f_{ск}(\nu) d\nu, \quad (4.4)$$

где I_i – спектры излучения атмосферы моделей М. Матрикарди, $f_{ск}(\lambda)$ – спектральная функция чувствительности канала радиометра, $N = \int_{\nu1}^{\nu2} f_{ск}(\lambda) d\lambda$ – норма $f_{ск}$, $\nu1$, $\nu2$ – границы рабочей спектральной полосы канала. Измерения в канале 10.8 мкм пересчитывались с помощью метода наименьших квадратов в измерения «озонного» канала 9.7 мкм. По формуле (4.2) вычислялись эффективные оптические толщины атмосферы τ_i для каждой модели.

Для иллюстрации на рисунке 4.3 показана регрессионная зависимость $O3_i$ и величины τ_i , отражающей вариации общего содержания озона в разных моделях. Коэффициент корреляции $R = 0,84$, стандартная ошибка линии регрессии – 16,4 ед. Дб.

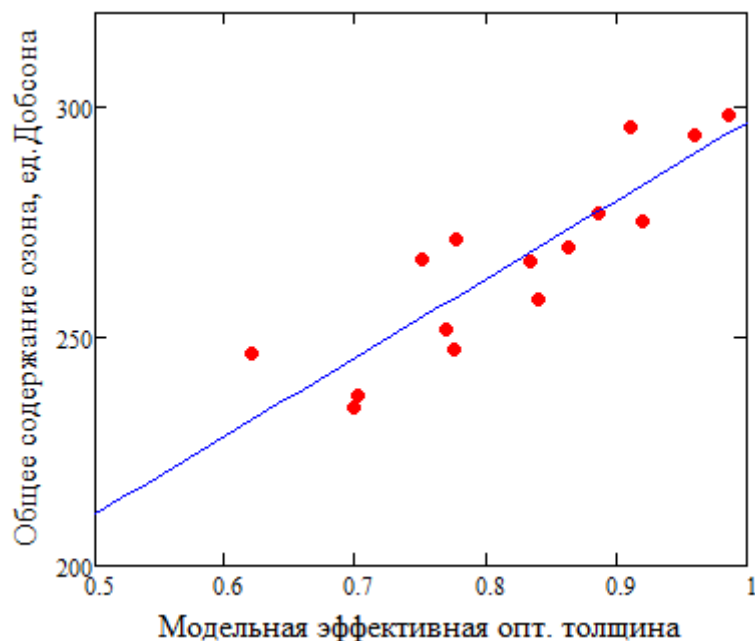


Рисунок 4.3 – Регрессионная зависимость общего содержания озона от эффективной оптической толщины по модельным данным

Практическая отработка методики проводилась на измерениях в ИК каналах радиометра SEVIRI, установленного на КА Meteosat-11 (0° в. д., с. ш.) Стабильность и надежность его измерений подтверждается постоянно проводимыми интеркалибровочными работами.

Пиксели яркостных температур, полученные в каналах 9.7, 10.8 и 12.0 мкм и расположенные в узлах фиксированной широтно-долготной сетки радиометра SEVIRI, интерполируются в ячейки условной градусной сетки. При этом должны выполняться следующие условия:

- количество пикселей в одной ячейке условной градусной сетки должно быть больше 100 единиц;

- в ячейке разность максимальной и минимальной ЯТ «источников» (ЯТ пересчитанных из 10.8 и 12.0 мкм в измерения 9.7 мкм), должна быть больше 20К.

Яркостная температура «источника» излучения рассчитывается из измерений в каналах окна прозрачности атмосферы:

$$T_{9.7}^* = T_{10.8} + \alpha_0(T_{10.8} - T_{12.0}), \quad (4.5)$$

где $\alpha_0 = 0,63$ - эмпирический коэффициент, полученный функцией минимизации ошибок при пересчете ЯТ из одного ИК канала в другой. Вычисление интенсивности излучения источника $P_{9.7}^*$ проводилось с

использованием $T_{9,7}^*$ по обратной функции Планка (2.7) для $\lambda=9,7$ мкм. По яркостным температурам, измеренным в канале 9,7 мкм, с использованием функции Планка выполнялся расчет интенсивности излучения $I_{9,7}$ [86].

Как следует из рисунка 4.4, эффективная оптическая толщина τ может быть найдена как натуральный логарифм коэффициента a линейной регрессии измерений в канале 9,7 мкм и интенсивности излучения «источника»:

$$\tau = -\ln(a) \quad (4.6)$$

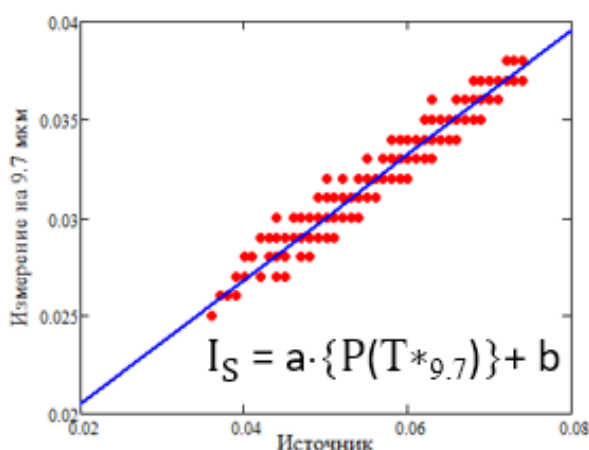


Рисунок 4.4 – Интенсивность излучения, регистрируемая от источника и измеренная в «озонном» канале, для различных пикселей в одной ячейке градусной сетки

В качестве априорных для построения регрессии привлекались данные об общем содержании озона, полученные по измерениям OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленного на полярно-орбитальном космическом аппарате AURA [83]. Исследования подтверждают стабильность и качество его измерений [84, 85].

Рассчитанные по (4.6) эффективные оптические толщины атмосферы τ в ячейках градусной сетки ставились в соответствие с данными общего содержания озона OMI, также расположенных в ячейках градусной сетки, с учетом косинуса зенитного угла наблюдения из пикселя на геостационарный спутник.

По результатам обработки измерений SEVIRI и OMI за нескольких дней 2020 года (20 января, 7 марта, 18 апреля, 29 мая и 23 июня) была найдена регрессионная зависимость

$$KOZ_{sev} = \frac{180 * \frac{r^{1.9}}{sec(ZA)}}{1 + \beta * sec(ZA)} + 188.4, \quad (4.7)$$

где $\beta = 0,08$ – эмпирический коэффициент. Корреляция между эффективной оптической толщиной и общим содержанием озона составила 0,8 в пределах 60-градусного круга от подспутниковой точки SEVIRI. Среднеквадратическая невязка оценок – примерно 20 единиц Добсона. На рисунке 4.5 представлены карты общего содержания озона по данным SEVIRI и OMI за 10 апреля 2022 года. Видны хорошие совпадения в оценках в тех местах, где присутствует облачность.

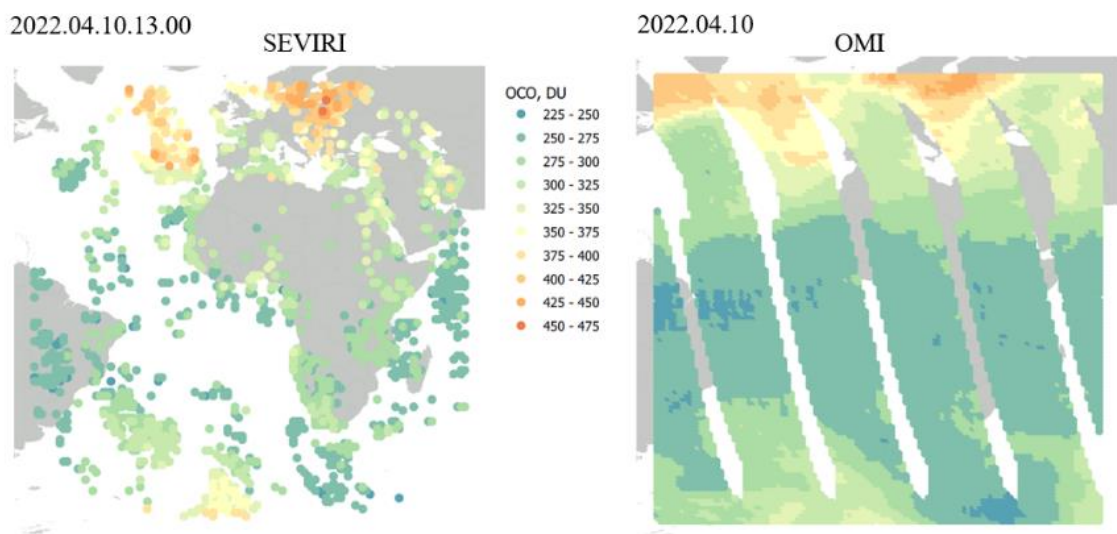


Рисунок 4.5 - Оценка общего содержания озона по измерениям в ИК канале SEVIRI (слева) и OMI (справа), 10.04.2022

Разработанный алгоритм возможно применить для определения общего содержания озона по данным измерений в ИК каналах отечественных радиометров МСУ-ГС, устанавливаемых на геостационарных КА серии Электро-Л и Арктика-М, при условии, что среднеквадратическое отклонение разброса ЯТ в озоновом канале и каналах водяного пара не будет превышать 1,2К [76].

4.3 Определение общего содержания диоксида углерода по измерениям ИКФС-2

Методики определения общего содержания диоксида углерода по измерениям в ИК каналах спектрометров используют либо быстрые радиационные модели, либо прогностические профили температуры и концентрации газов [87] и применимы в условиях отсутствия облачности.

В основе новой разработанной методики [88] лежит поиск регрессионной зависимости между рассчитанными эффективными оптическими толщинами атмосферы τ в нескольких каналах ИКФС-2 и количеством диоксида углерода.

Методика не предполагает использование прогностических профилей температуры или газовых составляющих атмосферы. Выбор в качестве предикторов оптических толщин τ позволяет создать алгоритм, который сохраняет работоспособность при наличии облачности. Оптическая толщина τ определяется по измерениям ИКФС-2 в диапазоне 11 – 14 мкм, который захватывает ИК окно прозрачности атмосферы и коротковолновое крыло полосы поглощения CO₂ 15 мкм.

Оптические толщины $\tau_{i,j}$ для i -го пикселя j -го канала ИКФС-2, где в качестве источника излучения могут выступать либо подстилающая поверхность, либо облачность, рассчитываются исходя из закона Бугера-Ламберта. При этом предполагается экспоненциальный характер функций пропускания газов и пренебрегается эффектом Форбса и собственным излучением атмосферы [89]:

$$\tau_{i,j} = \ln(\varepsilon) - \ln\left(\frac{R_{i,j}}{R_{T_{i,j}}}\right) \cdot \cos(Z_i), \quad (4.8)$$

где ε - коэффициент излучения земной поверхности в соответствии с классификацией типов земной поверхности IGBP [90, 91] или облака с $\varepsilon = 1$; $R_{i,j}$ - интенсивность регистрируемого ИКФС-2 уходящего излучения подстилающей поверхности i -го пикселя в j -м канале, $R_{T_{i,j}}$ - расчетная (по функции Планка) интенсивность излучения абсолютно черного тела с

температурой T ; T - ЯТ, измеренная в канале ИКФС-2 с частотой $\nu_0=900,1 \text{ см}^{-1}$, Z_i - зенитный угол визирования КА из пикселя.

Для учета количества диоксида углерода, находящегося в подоблачном слое, найденные значения $\tau_{i,j}$ корректируются исходя из предположения, что относительная концентрация молекул диоксида углерода в этом слое постоянна. Тогда оптическая толщина $x_{i,j}$ CO_2 во всем атмосферном столбе (от подстилающей поверхности до верхней границы атмосферы) будет равна:

$$x_{i,j} = \frac{P_0}{P_{T_i}} \cdot \tau_{i,j}, \quad (4.9)$$

где P_0 - давление у поверхности Земли, а P_T – давление на верхней границе облачности с температурой T . Профили давления и температуры берутся из Глобальной прогностической системы GFS NCEP. Поправка на высоту излучающего слоя приводит к выравниванию оптических толщин между различными пикселями ИКФС-2 (красная линия на рисунке 4.6) и повышает информативность в его каналах: для каналов $732,1 \text{ см}^{-1}$ и $742,6 \text{ см}^{-1}$ коэффициент корреляции $x_{i,j}$ равен 0,42, т.е. существенно ниже чем для ЯТ и оптических толщин $x_{i,j}$ без поправок.

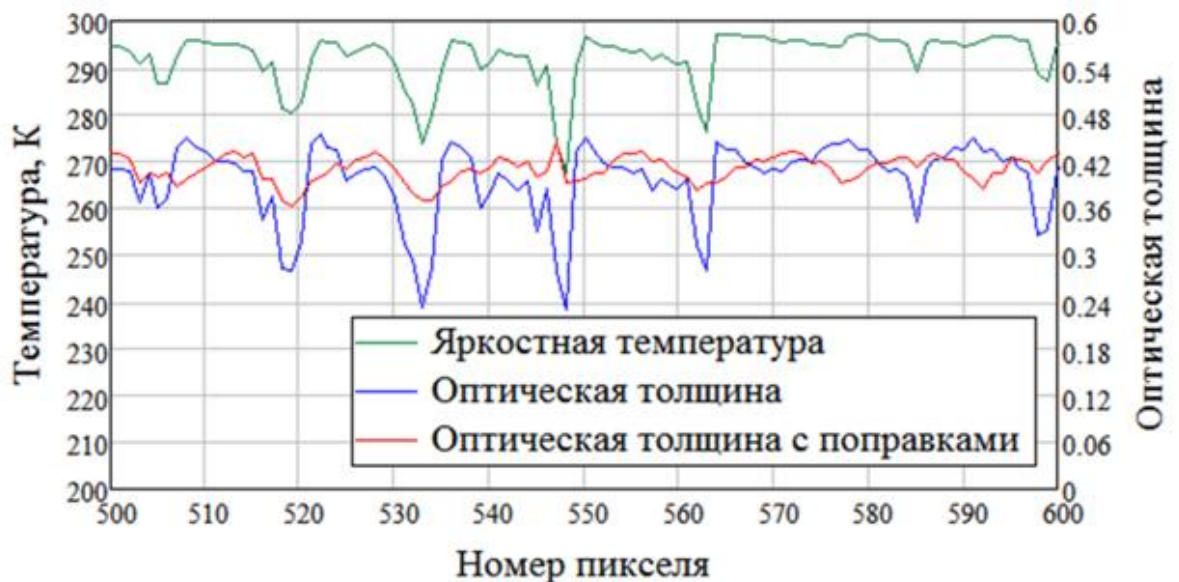


Рисунок 4.6 – Поправка вычисленных оптических толщин на высоту излучающего слоя

Теоретическое обоснование методики, основанной на нахождении регрессионной зависимости между оптическими толщинами τ и общим

содержанием диоксида углерода, было показано в [92] с использованием моделирования спутниковых измерений ИКФС-2 в условиях сплошной облачности и безоблачной атмосферы.

В качестве априорных данных использовались измерения концентрации CO_2 на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO на базе экспериментальной площадки Института Леса им В. Н. Сукачева СО РАН, расположенной в Центральной Сибири (Красноярский край, Туруханский район). Измерения на мачте ведутся круглосуточно в течение ряда лет одновременно на шести уровнях мачты с интервалом 9 минут с абсолютной точностью $0,25 \text{ млн}^{-1}$. Для их проведения используется один и тот же аппаратный комплекс. Точность и стабильность данных, получаемых с его помощью, контролируется регулярными калибровками по стандартным газовым смесям ВМО. Обработка данных также проводится по одной и той же процедуре. Географическое расположение обсерватории ZOTTO [93] обеспечивает возможность наблюдения максимальных сезонных изменений регистрируемых значений концентрации CO_2 , что позволяет проверить способность выделения созданным алгоритмом межгодового тренда XCO_2 на фоне внутригодового цикла. Пространственное рассогласование положения мачты ZOTTO с центрами пикселей ИКФС-2 КА Метеор-М №2, спектры которых привлекались для обработки, не превышало 100 км.

Измерения на ZOTTO отбирались в послеполуденное время только в те дни, когда тропосфера была хорошо перемешана и на всех шести уровнях мачты (4, 52, 92, 156, 227 и 301 м) объемная концентрация CO_2 была одинаковой с точностью до 1 млн^{-1} . Это позволяло исключить завышение средних концентраций CO_2 , связанных с его накоплением при температурной инверсии. На рисунке 4.7 показан ряд измерений на четырех уровнях мачты в июле 2015 года, где звездочками отмечены отобранные для построения регрессии дни и значения концентраций CO_2 .

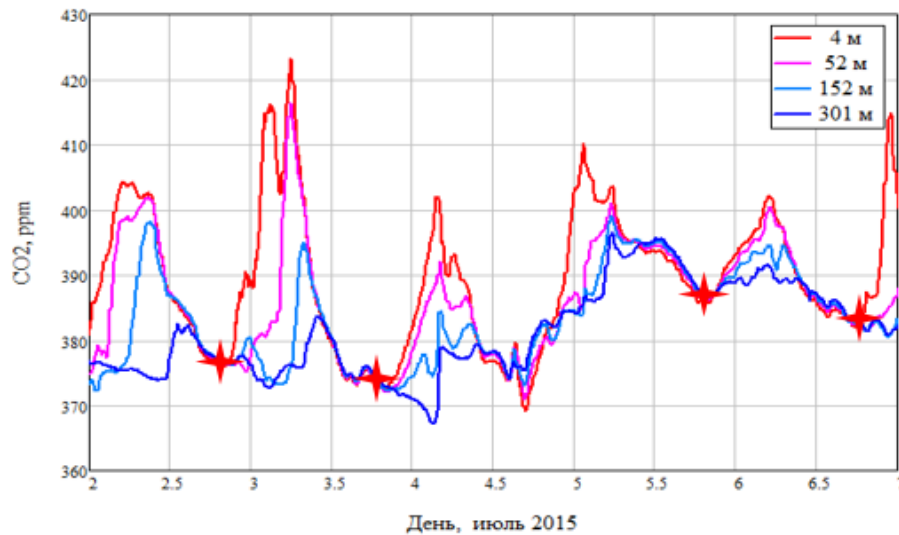


Рисунок 4.7 – Временной ход концентраций CO₂ на 4 высотах уровнях мачты ZOTTO

Пересчет измеренных объемных концентраций на общее содержание в столбе выполнялся интегрированием вертикального профиля концентрации CO₂ по давлению с учетом вертикальных профилей температуры и влажности из GFS NCEP. Исходя из результатов [94] профиль концентрации CO₂ полагался равным измеренному на станции ZOTTO до высоты 1,5 км. Выше 7 км профиль задавался по среднесуточной концентрации диоксида углерода, измеренной на обсерватории Мауна-Лоа (США). В интервале 1,5 – 7 км осуществлялась линейная интерполяция между этими значениями по высоте. Для построения регрессии были взяты данные измерений за 2015 – 2016 гг.

Общее содержание диоксида углерода по данным ИКФС-2 рассчитывается с помощью полинома второго порядка:

$$C_i = w_0 + \sum_{j=1}^k [w_j \cdot x_{i,j} + w_{j+k} \cdot x_{i,j}^2], \quad (4.10)$$

где w_0 и w_j - коэффициенты регрессии, C_i - эталонные XCO₂, $x_{i,j}$ - рассчитанные полные оптические толщины атмосферы для выбранных k каналов ИКФС-2 и два дополнительных параметра: температура поверхности по данным NCEP GFS и ЯТ на частоте $\nu_0 = 900,1 \text{ см}^{-1}$.

Определение значений w_0 , w_j , w_{j+k} вектора W в (4.10) производится методом наименьших квадратов:

$$W = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot C \quad (4.11)$$

Ошибки регрессии оценивались по дисперсии D после расчета остаточной суммы квадратов по формуле

$$D = C^T \cdot C - W^T \cdot X^T \cdot C \quad (4.12)$$

Из 150 каналов ИКФС-2 в диапазоне 712,50-764,65 см^{-1} выбирались случайные комбинации каналов. Для каждого сочетания каналов проводился расчет коэффициентов по (4.11) и оценивалась дисперсия D (4.12) отклонения линии регрессии. Из полученных данных выбирались те сочетания, для которых дисперсия оказалась минимальной. Количество водяного пара в атмосферном слое учитывалось специальным предиктором: отношением ЯТ в каналах с $\nu_0=900,1 \text{ см}^{-1}$ и $\nu=887,15 \text{ см}^{-1}$.

По результатам серии расчетов была выбрана регрессионная модель, в которой используется полином 2-го порядка. В качестве предикторов используются оптические толщины X_{ij} , вычисленные по измерениям в пяти каналах ИКФС-2, а также температура поверхности по данным NCEP GFS и ЯТ в канале с $\nu_0=900,1 \text{ см}^{-1}$.

Для валидации использовались измерения инфракрасного фурье-спектрометра CrIS КА NOAA и спектрометра OCO (Orbiting Carbon Observatory) КА OCO-2, регистрирующего солнечное отраженное излучение.

Для оценки X_{CO_2} [95] используется регрессия, связывающая рассчитанные значения ЯТ в каналах CrIS с различным содержанием CO_2 в безоблачной атмосфере. В условиях разорванной облачности проводится оценка облачного балла и измерения приводятся к безоблачным с использованием линейной комбинации измерений интенсивности излучения в 9 каналах. При сплошной облачности, как и для ИКФС-2, используются прогностические данные о давлении в приземном слое и на верхней границе облачности.

В отличие от ИКФС-2 и CrIS ширина полосы сканирования прибора OCO составляет 10 км. Линейный размер пикселя менее 3 км [96]. Восстановление

ХСО₂ по данным ОСО осуществляется только в безоблачных атмосферных сценах. В настоящее время данные ОСО рассматриваются как эталонные [97].

На рисунке 4.8 приведены карты измерений общего содержания диоксида углерода по данным ИКФС-2CrIS и ОСО над территорией Сибири. Разрывы в данных ИКФС-2 вызваны перерывом съемки при проведении бортовой калибровки. Для наглядного сравнения результатов валидации на рисунке 4.8 справа внизу приведены вероятностные распределения оценок ХСО₂, полученные для каждого прибора отдельно.

Средние значения ХСО₂ и стандартные отклонения для всей представленной территории: ИКФС-2 – 411,3 млн⁻¹ и 5,2 млн⁻¹, CrIS – 411,5 млн⁻¹ и 3,5 млн⁻¹, ОСО – 407,9 млн⁻¹ и 3,2 млн⁻¹ соответственно. Разброс оценок ХСО₂ по данным ИКФС-2, примерно в 1,5 раза превышающий разброс оценок у зарубежных приборов, может быть вызван попаданием в пиксель ИКФС-2 (~ 35 км) разорванной облачности. В этом случае поправка $x_{i,j}$ на $\tau_{i,j}$ носит приближенный характер, так как нет четко выраженной верхней границы облачности и ошибка регрессии будет возрастать.

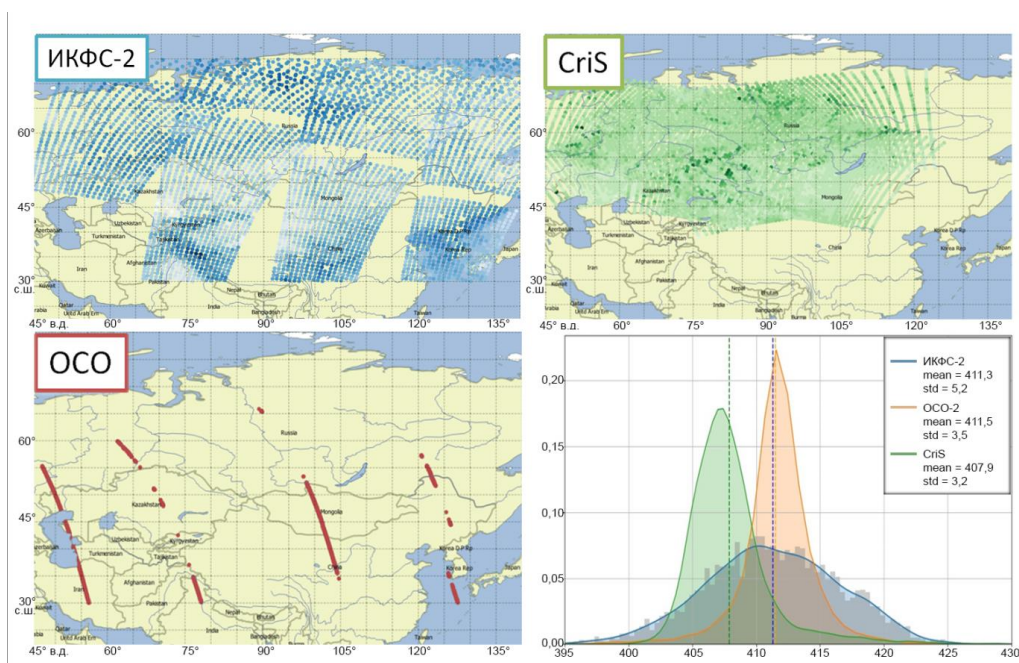


Рисунок 4.8 - Измерения общего содержания ХСО₂ (17 октября 2021 г.) по данным ИКФС-2 (а), CrIS (б) и ОСО (в) и гистограммы распределения оценок

В Таблице 4.1 представлены средние значения содержания XCO_2 и СКО его определения по данным ИКФС-2, CrIS и ОСО за период с 9 по 19 октября 2021 г. над территорией Сибири.

Таблица 4.1 Результаты сравнения ИКФС-2, CrIS, ОСО-2 с 9 по 19 октября 2021 г.

Дата	ИКФС-2		CrIS		ОСО	
	Среднее значение CO_2 , млн ⁻¹	СКО, млн ⁻¹	Среднее значение CO_2 , млн ⁻¹	СКО, млн ⁻¹	Среднее значение CO_2 , млн ⁻¹	СКО, ppm
9	410,5	5,4	407,7	3,4	411,5	3,8
10	411,3	5,2	407,9	3,29	411,5	3,5
11	410,4	4,7	408,7	3,5	411,9	3,2
12	410,8	5,1	409,1	3,6	411,9	3,8
13	411,1	5,2	408,5	3,5	411,9	4,4
14	411,8	5,5	407,8	4,4	412,0	3,6
15	412,5	5,7	407,6	3,8	412,6	4,2
16	411,3	5,5	407,0	3,2	411,9	4,4
17	410,2	5,6	407,2	3,2	413,5	3,3
18	410,8	6,5	407,5	3,4	413,0	4,9
19	411,5	6,4	407,9	3,9	413,8	3,9

Средние значения определения XCO_2 по данным измерений ИКФС-2 в пределах 2,3 млн⁻¹ совпадают с оценками ОСО [92].

Проведенная валидация разработанной методики определения общего содержания диоксида углерода по данным ИКФС-2 подтвердила ее работоспособность [98]. На основе этой методики в НИЦ «Планета» выполняется регулярное восстановление значений общего содержания диоксида углерода XCO_2 по данным ИКФС-2 КА Метеор-М №2 (onir.rcpod.space).

Следует отметить, что набор используемых каналов ИКФС-2, вид регрессии и значения ее коэффициентов, полученные по данным измерений отечественного КА над Центральной Сибирью в 2015–2016 годах, применяются в настоящее время без каких-либо корректировок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методики калибровки инфракрасных каналов радиометра МСУ-МР для КА серии Метеор-М с использованием измерений ИК каналов радиометра SEVIRI и наблюдений за температурой воздуха на наземных станциях в Гренландии и/или Антарктиде.

Осуществлена интеркалибровка фурье-спектрометра ИКФС-2 по данным измерений радиометра SEVIRI на геостационарном КА Meteosat. Получены следующие калибровочные коэффициенты для ИКФС-2: для спектрального диапазона, равного каналу SEVIRI 7.3 мкм – 0,234К, 8.7 мкм – 0,096К, 9.7 мкм – 0,153К, 10.8 мкм – 0,081К, 12.0 мкм – 0,002К, 13.4 мкм – 0,044К.

Разработана методика интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-ГС КА Электро-Л №1 по данным измерений зондировщиков на полярно-орбитальных КА. Проверка методики выполнена на примере интеркалибровки ИК каналов радиометра SEVIRI и данных AIRS. Методика может быть применима для будущих радиометров МСУ-ГС.

Разработана методика интеркалибровки ИК каналов МСУ-ГС с использованием измерений аналогичных геостационарных радиометров. Постоянно проводимая калибровка позволяет оценить суточный ход смещения для различных ЯТ.

Создан способ определения реального пространственного разрешения ИК каналов радиометра МСУ-ГС. На конец мая 2020 года пространственное разрешение в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №3 составляло ~ 8 км. После этого разработчиками аппаратуры проведена коррекция программно-математического обеспечения первичной обработки данных и его пространственное разрешение оценивалось ~ 5,4 км.

Разработана методика оценки общего содержания озона по измерениям ИК каналов геостационарных радиометров. Особенность методики в том, что она разработана для условий разорванной облачности без использования прогностических данных. При сравнении с эталонными данными ОМІ

получена среднеквадратическая невязка примерно в 20 единиц Добсона. Разработчиками МСУ-ГС принято решение о сужении канала 9,7 мкм аппаратуры.

Разработана методика оценки общего содержания диоксида углерода по измерениям ИК фурье-спектрометра ИКФС-2 с учетом облачности. Методика основана на нахождении регрессионной связи между эффективной оптической толщиной атмосферы, рассчитанной в нескольких каналах ИКФС-2 в диапазоне 11 - 14 мкм, и количеством диоксида углерода в атмосфере. При сравнении с данными измерений американского спектрометра ОСО на КА ОСО-2, измеряющего характеристики отраженного солнечного излучения в безоблачных условиях, среднеквадратическая невязка оценок не превышала 2 млн^{-1} .

Разработанные методики интеркалибровки реализованы в виде программного обеспечения в СВПН НИЦ «Планета». Результаты интеркалибровок доступны на сайте <http://planet.rssi.ru/calval>.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AHI	—	Advanced Himawari Imager
AIRS	—	Atmospheric Infrared Sounder
AMI	—	Advanced Meteorological Imager
AURA	—	Earth Observation System - Aura
BT	—	Brightness temperature
CGMS	—	Coordination Group for Meteorological Satellites (Координационной группы по метеорологическим спутникам)
CrIS	—	Cross-track Infrared Sounder
Eumetsat	—	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GEO	—	Группа наблюдения за Землей
Geo	—	Geosynchronous Equatorial Orbit (геостационарная орбита, 36 000 км)
GEOSS	—	Глобальная система наблюдения за Землей
GOS	—	Global Observing System (Глобальная система наблюдений)
GSICS	—	Global Space-based Inter-Calibration System (Глобальная космическая система взаимных калибровок)
HgCdTe	—	Ртуть-кадмий-теллур
IASI	—	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
LBLRTM	—	Line-By-Line Radiative Transfer Model
Leo	—	Low Earth Orbit (низкая орбита, около 830 км)
NESR	—	Пороговая спектральная плотность яркости
OMI	—	Ozone Monitoring Instrument
OCO	—	Orbiting Carbon Observatory
OCO-2	—	Космический аппарат Orbiting Carbon Observatory - 2
RTTOV	—	Radiative Transfer for TOVS
SEVIRI	—	Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager
SNO	—	Simultaneous Nadir Overpasses

SRF	—	Spectral Response Function
ZOTTO	—	Высотная мачта научной обсерватории в пос. Зотино Красноярского края (Туруханский район)
АЧТ	—	Абсолютно черное тело
ВМО	—	Всемирная метеорологическая организация
ИАЧТ	—	Имитатор абсолютно черного тела
ИГСН	—	Интегрированная глобальная система наблюдений
ИК	—	Инфракрасный
ИКФС-2	—	Инфракрасный фурье-спектрометр
КА	—	Космический аппарат
ЛИ	—	Летные испытания
МДР	—	Метод двойных разностей
МСУ-ГС	—	Многозональное сканирующее устройство геостационарное
МСУ-МР	—	Многозональное сканирующее устройство малого разрешения
САФ	—	Спектрально-аппаратная функция
СВПН	—	Система валидационных подспутниковых наблюдений
СИ	—	Международная система единиц
СКО	—	Среднее квадратическое отклонение
ТПО	—	Температура поверхности океана
ТПС	—	Температура поверхности суши
ЯТ	—	Яркостная температура

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по Глобальной системе наблюдений // Всемирная метеорологическая организация. ВМО-№ 488. 2017. 252 с.
2. Тимофеев Ю. М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности: Санкт-петерб. гос. университет, Физ. фак, Санкт-Петербург. 2010. 129 с.
3. Global Space-based Inter-Calibration System [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <https://gsics.wmo.int/en> (дата обращения: 2022.05.08).
4. Goldberg, M. et al. The Global Space-Based Inter-Calibration System. Bulletin of the American Meteorological Society 92(4):467. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/266409658_The_Global_Space-Based_Inter-Calibration_System. DOI:10.1175/2010BAMS2967.1.
5. Chander, Gyanesh, Hewison, Tim J., Fox, Nigel, Wu, Xiangqian Xiong, and Blackwell, William J. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. P. 1056:1080.
6. Fangfang Yu et al. GSICS GEO-LEO Inter-Calibration: Operation Status at NOAA/NESDIS. Proc. of SPIE Vol. 7456 74560A-1. DOI:10.1117/12.826146.
7. GSICS References [Электронный ресурс]: Эталонные приборы, рекомендованные GSICS URL: <http://gsics.atmos.umd.edu/bin/view/Development/GSICSReferences>. (дата обращения: 2022.03.01).
8. Hewison T.J., Wu X., Yu F., Tahara Y., Hu X., Kim D., Koenig M., GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing.2013.Vol. 51.No.3, pp. 1160–1170.
9. ATBD for EUMETSAT Operational GSICS Inter-Calibration of Meteosat-IASI. EUM/TSS/TEN/15/803179. v1B e-signed. 3 February 2016.

10. Schmetz, J., Pili, P., Ratier, A., Rota, S., Tjemkes, S. Meteosat Second Generation (MSG): capabilities and applications // 11th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. American Meteorological Society. 2001.
11. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool [Электронный ресурс]: URL: <https://space.oscar.wmo.int/instruments> (дата обращения: 2022.03.01).
12. Tahara, Yoshihiko and Koji Kato, 2009: New Spectral Compensation Method for Intercalibration Using High Spectral Resolution Sounder, Meteorological Satellite Center Technical Note, No. 52, 1-37.
13. Bertrand Théodore, Dorothée Coppens. Intercomparison of IASI and CrIs spectra. EUMETSAT. URL: <https://www.eumetsat.int/media/16184>.
14. Wang, L., Goldberg, M., Wu, X., Cao, Ch., Iacovazz, R. A., Yu, F., Li, Ya. Consistency assessment of Atmospheric Infrared Sounder and Infrared Atmospheric Sounding Interferometer radiances: Double differences versus simultaneous nadir overpasses. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. <https://doi.org/10.1029/2010JD014988>. 2011.
15. Kim, D., Gu, M., Oh, T.-H., Kim, E.-K., Yang, H.-J. Introduction of the Advanced Meteorological Imager of Geo-Kompsat-2a: In-Orbit Tests and Performance Validation. Remote Sens. 2021, 13, 1303.
16. Кульчицкий, Н., Наумов, А., Старцев, В. Охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона на кадмий-ртуть-теллуре: состояние и перспективы развития // Производственные технологии. — 2020. — Вып. 6. — С.114-121.
17. Головин, Ю. М., Завелевич, Ф. С., Никулин, А. Г., Козлов, Д. А., Монахов, Д. О., Козлов, И. А., Архипов, С. А., Целиков, В. А., Романовский, А. С. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли//Исследование земли из космоса. — 2013. —№ 6. — С. 25–37.

18. Polyakov A., Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Uspensky A., Zavelevich F., Golovin Yu., Kozlov D., Rublev A., Kukharsky A. Satellite atmospheric sounder IRFS-2 1. Analysis of outgoing radiation spectra measurements // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 9. P. 1185–1191.
19. Завелевич, Ф.С., Головин, Ю.М., Десятов, А.В., Мацицкий, Ю.П., Никулин, А. Г., Романовский, А.С., Горбунов, Г.Г., Городецкий, А.К., Воронкевич, А.В. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2006. — В.3. — Т.1. — С. 224-230.
20. Козлов Д. А. Исследование точностных характеристик и методика калибровки бортовых инфракрасных фурье-спектрометров температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли //Дисс. кандидата технических наук / Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. Москва, 2016.
21. Десятов, А. В., Головин, Ю. М., Завелевич, Ф.С., Мацицкий, Ю. П., Козлов, Д. А., Болмосов, И. В., Монахов, Д. О., Архипов, С. А., Целиков, В. А., Линько, В. М., Романовский, А. С. Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. —Т.7. — №2. С.241 – 248.
22. Козлов Д.А., Козлов И.А., Успенский А.Б., Рублев А.Н., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Колесников М.В. Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // *Исследование Земли из космоса*. — 2022. — №1. — С. 53-67.
23. 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.
24. Polyakov A., Timofeyev Y., Virolainen Y., Kozlov D. Atmospheric ozone monitoring with Russian spectrometer IKFS-2 // J. Applied Spectroscopy. 2019. V. 86. № 4. P. 650–654.
 25. Поляков, А. В., Виролайнен, Я. А., Тимофеев Ю. М., Неробелов Г. М. Измерения содержания озона на основе спектров ИКФС-2 в 2015-2020 гг. // Материалы 19-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — 2021. — 141 С.
 26. Акимов, Н.П., Бадаев, К. В., Гектин, Ю. М., Рыжаков, А. В., Смелянский, М. Б., Фролов, А. Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2015. — Т.2. — вып.4. — С.30-39.
 27. Бадаев, К. В., Гектин, Ю. М., Гулин, Ю. Ю., Зайцев, А. А., Максин, В. Н., Пузаков, Н. П., Сахаров, В. Н., Серебряков, Д. С., Смелянский, М. Б., Фролов, А. Г. Развитие аппаратуры ДЗЗ серии МСУ-МР в части повышения точности радиометрических измерений и расширений ее функциональных возможностей // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2020 — Т. 7. — вып. 4. — С.63-73.
 28. Гектин, Ю. М., Романов, А. В., Смелянский, М. Б., Цветкова, И. П. Решение теоретических и практических задач метрологического обеспечения многозонального сканирующего устройства МСУ-МР в ИК-диапазоне спектра // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического

- приборостроения и информационных технологий», Москва: ФИЗМАТЛИТ. — С. 91-98.
29. Асмус, В. В., Дядюченко, В. Н. Загребаяев, В. А., Милехин, О. Е., Соловьев, В. И., Успенский, А. Б. Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина». — 2012. — №1. — С.3-14.
 30. Гектин, Ю. М., Селиванов А. С. Многозональное сканирующее устройство для геостационарного метеоспутника «Электро-Л» № 1. Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. — 2015. — № 3 (29). — С. 114-117.
 31. Гектин, Ю. М., Андреев, Р. В., Зайцев, А. А. Результаты эксплуатации аппаратуры МСУ-ГС на КА «Электро-Л» №3 и перспективы ее дальнейшего развития. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2021. — Т.8. — вып.2. — С.20-26.
 32. Москатынъев И.В., Балиев А.В., Павлова Т.В., Гектин Ю.М., Акимов Н.П., Смелянский М.Б., Сулиманов Н.А., БадаевК.В., Рыжаков А.В., Фролов А.Г., Андреев Р.В., Зайцев А.А. Основные результаты эксплуатации аппаратуры МСУ-ГС на КА «Электро-Л» № 2 // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. — 2017. — № 2 (36). — С. 108-114.
 33. Методика радиометрической калибровки многозонального сканирующего устройства МСУ-ГС для геостационарного гидрометеорологического космического комплекса «Электро». № И-0423/12 от 15.01.2014г. АО «РКС».
 34. Космические информационные системы и приборы оптического диапазона для дистанционного зондирования Земли / Урличич Ю.М. [и др.]. // Труды Открытого акционерного общества / Рос. корпорация ракет.-косм. приборостроения и информ. систем (ОАО «Рос. косм. системы») — М.: Медиа Паблишер, 2012. — 120 с.

35. Filei A., Rublev A., Zaitsev A. Radiometric inter-calibration of MSU-MR shortwave channels on-board Meteor-M No. 2 relative to AVHRR on-board Metop-A // GSICS Quarterly: Winter Issue 2018, Volume 12, No. 1, 2018, Page 11-13, DOI: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.
36. Filei A., Rublev A., Kiseleva Yu., Zaitsev A. Radiometric inter-calibration between MSU-GS and VIIRS shortwave channels // GSICS Quarterly: Winter Issue 2018, Volume 12, No. 1, 2018, Page 13-15, DOI: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.
37. Gayfulin D., Tsyrulnikov M., Uspensky A. Assessment and Recalibration of Meteor-M N2 Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY data in Atmospheric Sounding Channels // GSICS Quart. Newsletter, 2018, v.12, N1.
38. Line-By-Line Radiative Transfer Model [Электронный ресурс]: URL:<http://rtweb.aer.com/lblrtm.html>.
39. Рублев, А. Н. Моделирование переноса оптического излучения в задачах радиационной климатологии и определения параметров земной атмосферы // Диссертация д-ра физ.-мат. наук / Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН. Москва, 2013.
40. Matricardi, M. The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database. Technical Memorandum.2008.No.564.47 p.
41. Облака и облачная атмосфера: справочник / Мазин И. П., Хргиан А. Х., Имянитов И. М.; под ред. Мазин И. П., Хргиан А. Х.—Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 648 с.
42. Шметтер, С. М. Термодинамика и физика конвективных облаков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 288 с.
43. Рублев, А. Н., Голомолзин, В. В. Моделирование кучевых облаков // Препринт РНЦ «Курчатовский институт» — ИАЭ-5567/16. —1992. — 12 с.

44. Геогджаев, И. В., Кондранин, Т. В., Рублев, А. Н., Чубарова, Н. Е. Моделирование переноса УФ радиации через разорванную облачность и сравнение с измерениями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. —1997. —Т. 33, №5. — С.680-686.
45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615976. Программа интеркалибровки ИК-каналов радиометра МСУ-МР космического аппарата «Метеор-М» №2 / Киселева Ю. В. (RU) – заявка № 2018613270. Дата поступления 03 апреля 2018 г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 18 мая 2018 г.
46. Киселева, Ю. В., Рыжаков, А. В., Козлов, Д. А., Рублев, А. Н. Контроль калибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР по данным наземных измерений полярных полигонов // Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики». Сборник тезисов докладов. 2016. С. 100.
47. Отчет о результатах эксплуатации системы валидационных подспутниковых наблюдений для системы дистанционного зондирования Земли гидрометеорологического наблюдения за апрель 2022 года [Текст]: ежемесячный отчет по эксплуатации СВПН: 42-44/ФГБУ «НИЦ «Планета». – М., 2022. – 68 с.
48. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615978. Программа интеркалибровки инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 космического аппарата «Метеор-М» №2 / Киселева Ю. В. (RU) – заявка № 2018613276. Дата поступления 03 апреля 2018 г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 18 мая 2018 г.
49. Козлов, Д. А., Козлов, А. А., Завелевич, Ф. С., Киселева, Ю. В., Козлов, И. А., Кухарский, А. В., Рублев, А. Н., Успенский, А. Б., Черкашин, И. С. Оценки погрешности бортовой радиометрической калибровки ИК-зондировщика ИКФС-2 по данным радиометра SEVIRI// Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. —2016. — Т. 13. —№ 6. —С. 264–272.
50. Zavelevich, F., Kozlov, D., Kozlov, I., Cherkashin, I., Uspensky, A., Kiseleva, Yu., Golomolzin V., Filei, A. IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands. GSICS Quarterly: Winter Issue 2018. Vol. 12.No1.2018. doi: 10.7289/V5/QN-GSICS-12-1-2018.
 51. Tobin, David C. et al. Werner Radiometric and spectral validation of Atmospheric Infrared Sounder observations with the aircraft-based Scanning High-Resolution Interferometer Sounder // J.C.R.2006.vol.111.d09s02.doi:10.1029/2005jd006094.
 52. Gunshor, Mathew M., Schmit, Timothy J., Menzel, W. Paul, Tobin, David C. Intercalibration of Broadband Geostationary Imagers Using AIRS // Atmos. Oceanic Technol.2009. 26.746–758.
 53. Киселева Ю.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Кухарский А.В., Рублев А.Н., Успенский А.Б. Интеркалибровка данных измерений в ИК-каналах радиометра геостационарного метеоспутника «Электро-Л» №1 по данным измерений ИК-зондировщика AIRS / Исследование Земли из космоса. 2015. — № 6. — С. 68.
 54. Тараканов, Г.Г. Тропическая метеорология. —Л: Гидрометеиздат. — 1980. — 174с.
 55. Рублев А.Н., Бухвиц М., Журавлева Т.Б. Сопоставление спутниковых и самолётных измерений концентраций углекислого газа над Западной Сибирью // Оптика атмосферы и океана. —2006. —Т. 19, № 4. — С. 322-327.
 56. Trishchenko, A.P., Khlopenkov K.V.,Luo Y, Bernath P. Probability of pixel contamination by cloud and cloud shadows for spaceborne sensors with large footprint size. //Presentation at joint ENVISAT/AURA/ACE Science Team Meeting. 2005.Nov 8-10, The Hague. Netherlands.

57. König, M., 2007: Inter-Calibration of IASI with MSG-1/2 onboard METEOSAT-8/9 // GSICS Quarterly.vol.1.No.2.August 2007.
58. 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, 18-20 October 2017. Vladivostok city, Russian Federation (http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/09/P-51_Kiseleva.pdf).
59. Hewison, Tim. Theoretical Basis for Meteosat SEVIRI-IASI Inter-Calibration Algorithm for GSICS. Version 0.3 (18 Nov 2008). URL: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/GCC/documents/GRWG/200812/Hewison_EUMETSAT_081216GRWG_SEVIRI-IASI_ATBD_v0.3.pdf.
60. Takahashi, M. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for GSICS Infrared Inter-Calibration of Imagers on MTSAT-1R/-2 and Himawari-8/-9 using AIRS and IASI Hyperspectral Observations. Meteorological Satellite Center Japan Meteorological Agency, Version: 2017-12-19 (v1.1).
61. Hewison, T. (2010). ATBD for Prototype GSICS SEVIRI-IASI Inter-Calibration. EUM/MET/TEN/09/0774. v2, 14.
62. Murata, Hidehiko, Yogo, Yusuke, Takahashi, Masaya. Himawari-8/9 AHI GEO-GEO Comparisons. Meteorological Satellite Center Japan Meteorological Agency GRWG/GDWG Annual Meeting, 19 -23 March, 2018, Shanghai, China 1.
63. Hillger, D. and Schmit, T. The GOES-15 Science Test: Imager and Sounder Radiance and Product Validations. Available online <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/1192>.
64. Rublev, Alexey N., Gorbarenko, Ekaterina V., Golomolzin, Vladimir V., Borisov, Evgeny Y., Kiseleva, Julia V., Gektin, Yuriy M., Zaitsev, Alexander A. Inter-calibration of infrared channels of geostationary meteorological satellite imagers. Front. Environ. Sci., 27 November 2018/<https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00142>.

65. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели)// Гидрометеиздат, Ленинград, 1991 г., 508 с.
66. Киселева, Ю. В., Рублев, А. Н., Голомолзин, В. В. Проведение интеркалибровки и оценка пространственного разрешения инфракрасных каналов радиометров геостационарных спутников серии Электро-Л // Сборник тезисов «Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2021). С. 16.
67. Резолюция ВМО №40. XII Всемирный метеорологический конгресс, ВМО-№827, Женева, 1995, 166 с.
68. ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения». – М.: Стандартинформ, 2009. – 21 с.
69. Качество спутниковой информационной продукции ABI КА GOES-R [Электронный ресурс]: URL: https://www.goes-r.gov/resources/docs/GOES-R_GS_FPS.pdf.
70. Адлер Ю. А., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М. : Наука, 1976.
71. Harrington, E.C., Jr. The Desirability Function. Industrial Quality Control, (April 1965), 494-498, 1965.
72. AMI (Advanced Meteorological Imager) / formerly MI-(Meteorological Imager-II): URL <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geo-kompsat-2>.
73. Пичкалев, А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств. Исследования наукограда. – 2012. – № 1. – С. 25-28.
74. Опекунов, А. Ю., Опекунова, М. Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2014. – Сер. №7. – Вып. 4. – С. 101-113.
75. Андреев, Р. В., Гектин, Ю. М., Зайцев, А. А., Смелянский, М. Б. Специальные алгоритмы радиометрической коррекции изображений

- ДЗЗ в ИК-диапазоне // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т.3. – Вып.4. – С. 32-40.
76. Киселева, Ю. В., Рублев, А. Н., Филей, А. А. Сравнительная оценка качества измерений в спектральных каналах радиометров геостационарных спутников гидрометеорологического назначения // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. 2019. С.141.
 77. ATBD for the MSG GII/TOZ Product. EUM/MET/DOC/11/0247.v3.24 May 2013.
 78. Поляков, А. В., Тимофеев, Ю. М. Определение общего содержания озона с геостационарных спутников Земли// Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2008. — Т. 44. — № 6. — С. 804-811.
 79. Крамчанинова, Е.К., Успенский, А. Б. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере по данным российского геостационарного метеоспутника «Электро-Л» // Исследование Земли из космоса. — 2013. — № 2. — С. 12.
 80. Schmidt, C. C. and Hoffman, J. P. ABI Ozone Detection Algorithm Theoretical Basis, Sep. 2010, [online] Available: https://www.goes-r.gov/products/ATBDs/option2/AAA_Ozone_V2.0_no_color.pdf.
 81. Lee, Su Jeong, Ahn, Myoung-Hwan, Ha Seungmin et al. Total Column Ozone Retrieval From the Infrared Measurements of a Geostationary Imager // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Volume: 57, Issue: 8, Aug. 2019). P. 5642 – 5650.
 82. Gieske, A.S.M., Hendrikse, J., Retsios, V., Leeuwen, B. van, Maathuis, B.H.P., Romaguera, M., Sobrino, J.A., Timmermans, W.J., Su, Z. Processing of MSG-1 Seviri data in the thermal infrared - algorithm development with the use of the SPARC2004 data set.

83. Общее содержания озона по данным измерений OMI [Электронный ресурс]: URL: <https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/anonftp/toms/omi/data/ozone/>.
84. Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М., Поберовский А. В., Поляков А. В., Шаламянский А. М. Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30. – № 2. – С. 170-176.
85. Иванова Н. С. Сравнение наземных и спутниковых результатов измерения общего содержания озона //Труды Гидрометцентра России. — 2017. — Вып. 365. — С. 94-100.
86. Киселева Ю. В., Рублев А. Н. Определение общего содержания озона по данным измерений радиометров геостационарных гидрометеорологических космических аппаратов // Тезисы докладов Восьмой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — 2020. — С.50-51.
87. Успенский А. Б., Кухарский А. В., Романов С. В., Рублев А. Н. Мониторинг концентрации диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI. — Исследование Земли из космоса. —2011. — № 1. — С. 14–21.
88. 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. 79-96.
89. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. — СПб.: Наука 2003, 474 с.
90. Snyder W. et al. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space . — INT. J. Remote Sensing, 1998, v.19, 14. p. 2753-2773.

91. Belward A., Loveland T. The DIS 1km Land Cover Data Set, 1996, GLOBAL CHANGE. —The IGBP Newsletter, 1996, № 27, Sep. URL: <http://www.surf.larc.nasa.gov/surf/pages/explan.html>.
92. Рублев А. Н., Голомолзин В. В., Успенский А. Б., Панов А. В., Прокушкин А. С. Определение содержания CO₂ по измерениям метеорологического спутника Метеор-М №2/В сб. тезисов МСАРД – 2017, Санкт–Петербург. — 2017. — С. 19-20.
93. Heimann M., Schulze E. D., Winderlich J., Andreae M. O., Chi X., Gerbig C., Kolle O., Kübler K., Lavric J. V., Mikhailov E., Panov A., Park S.-B., Rödenbeck C., Skorochood A. The Zotino Tall Tower Observatory (Zotto) . — Quantifying large scale biogeochemical changes in Central Siberia, Nova Acta Leopoldina, 2014, 117(399), p. 51-64.
94. Аршинов М. Ю, Белан Б. Д., Давыдов Д.К., Креков Г. М., Фофонов А. В., Бабченко С. В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. — 2012. — № 12. — С. 1051 - 1061.
95. The NOAA Unique CrIS/ATMS Processing System (NUCAPS): Algorithm Theoretical Basis Documentation, vers. 1.0, August 21, 2013. 72 p.
96. OCO-2 Level 2 Full Physics Retrieval ATBD. National Aeronautics and Space Administration. January 15, 2021. Version 3.0, Rev 1.
97. Виролайнен Я. А., Никитенко А. А., Тимофеев Ю. М. Взаимная калибровка спутниковых и наземных спектроскопических измерений содержания CO₂ на станции NDACC St. Petersburg. — Журнал прикладной спектроскопии. — 2020. — Т. 87. — № 5. — С. 816-820.
98. 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.