

На правах рукописи

УДК 551.501.86

Киселева Юлия Викторовна

**ИНТЕРКАЛИБРОВКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГАЗОВЫХ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ**

25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета») в отделе космической метеорологии.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник **Рублев Алексей Николаевич**, заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук **Лупан Евгений Аркадьевич**, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук»

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **Юшков Владимир Александрович**, заведующий отделом физики высоких слоёв атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральная аэрологическая обсерватория»

**Ведущая организация:** АО «Российские космические системы»

Защита диссертации состоится 07 сентября 2022 г. в 14.00 на заседании Диссертационного совета Д.327.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., д 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на интернет-сайте <https://meteoinfo.ru/disserboard>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



М. В. Шатунова

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. В связи с этим 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, характеристики облачности), температуры и альbedo 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 сканеров 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 СВПП НИЦ «Планета».

3. Методика интеркалибровки ИК каналов МСУ-МР реализована в программном обеспечении «Программа интеркалибровки ИК-каналов радиометра 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 сканеров.

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 сканеров 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/>.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы, содержащего 98 наименований. Диссертация изложена на 113 страницах, содержит 51 рисунок, 11 таблиц.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цель и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость, степень разработанности исследования, формулируются основные положения, выносимые на защиту, описывается личный вклад автора, достоверность, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

**Первая глава** диссертации посвящена описанию работ по интеркалибровке спутниковой аппаратуры метеорологического назначения за рубежом и в России. В **разделе 1.1** проведен анализ существующих методик интеркалибровки ИК радиометров по эталонным приборам, рекомендованным GSICS. Для российских радиометров МСУ-МР и ИФКС-2, установленных на полярно-орбитальных КА серии Метеор-М, предложено проводить интеркалибровку по соответствующим ИК каналам радиометра SEVIRI геостационарных европейских КА серии Meteosat, который имеет стабильные радиометрические характеристики, подтвержденные в различных интеркалибровочных кампаниях.

Применительно к радиометру МСУ-ГС российских геостационарных КА серии Электро-Л следует отметить, что существующие методики интеркалибровки зарубежных геостационарных радиометров не могут быть применены к нему частично или полностью. Например, использование эталонного прибора – фурье спектрометра IASI, установленного на полярно-орбитальных КА серии Metop не позволяет выявить суточный ход калибровки МСУ-ГС: Metop проходит район, пригодный для интеркалибровки (вблизи подспутниковой точки геостационарного КА) только два раза в сутки.

В **разделе 1.2** приведены характеристики отечественных инфракрасных радиометров МСУ-МР, ИФКС-2 и МСУ-ГС, устанавливаемых на метеорологических КА серии Метеор-М и Электро-Л соответственно. **Раздел 1.3** посвящен описанию созданной в 2016 году в НИЦ «Планета» системы валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН), в программном обеспечении которой реализованы разработанные методики интеркалибровки. Данные о состоянии российских спутниковых приборов регулярно предоставляются на заседаниях GSICS и сайте НИЦ «Планета» (<http://planet.rssi.ru/calval/>).



Таким образом, обеспечено сопровождение измерений российской аппаратуры калибровочными поправками для их дальнейшего использования в различных приложениях и при создании новых спутниковых продуктов.

**Вторая глава** диссертации посвящена методикам интеркалибровки радиометров МСУ-МР и ИКФС-2 полярно-орбитальных КА серии Метеор по данным радиометра SEVIRI геостационарного КА серии Meteosat.

В **разделе 2.1** с помощью моделирования спутниковых измерений проанализировано влияние различия спектральных аппаратных функций (САФ) ИК каналов SEVIRI и МСУ-МР на результаты измерений яркостных температур (ЯТ). С этой целью спектры излучения, смоделированные с использованием программы LBLRTM (The Line-By-Line Radiative Transfer Model) для разных вертикальных профилей температуры, влажности и концентрации атмосферных газов сворачивались со САФ  $\varphi(\lambda)$  ИК каналов приборов: 
$$I_k = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_k \cdot \varphi(\lambda) d\lambda,$$
 где  $N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda$  - нормирующий множитель,  $R_k$  - рассчитанный спектр излучения для  $k$ -ой атмосферной модели. В результате моделирования показано, что выбором эффективной длины волны  $\lambda$  для каждого из сравниваемых каналов вычисление ЯТ можно проводить по обратной функции Планка  $T_B = B^{-1}(\lambda, I_k)$ , при этом влияние различий САФ сравниваемых приборов на результаты интеркалибровки практически полностью исчезает.

**Раздел 2.2** посвящен теоретическому обоснованию разработанной методики интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР по данным аналогичных каналов SEVIRI в малооблачных условиях. Суть методики заключается в нахождении в результатах измерений обоими радиометрами над океанической поверхностью в условиях разорванной облачности ЯТ, соответствующих безоблачной погоде, когда на результаты интеркалибровки не влияют различия в пространственном разрешении приборов. Обоснование проведено на основе трехмерного (3D) моделирования спутниковых измерений.

Кучевая облачность задавалась в виде конкретной реализации нормального случайного поля  $Z(r)$ , где  $r = \{x, y\}$  – высота верхней границы облачности, – ограниченного снизу на фиксированном уровне  $H_0$  – высоте нижней границы облачности. Реализации  $Z(r)$  строились для различных баллов облачности с

помощью известного алгоритма А. Н. Рублева и В. В. Голомолзина в узлах прямоугольной сетки на площади  $100 \times 100 \text{ км}^2$ . Шаг сетки  $h=0,2 \text{ км}$ , т.е. в 5 раз меньше линейного размера пикселя МСУ-МР (1 км) в надире или в 15 раз меньше пикселя SEVIRI (3 км). Интенсивность  $I_R$ , регистрируемая в конкретном спутниковом пикселе, определяется суммой  $I_R = \frac{\sum_i \sum_j B(\lambda, T_c(z)) P(T_c(z))}{n^2}$ , 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 различным атмосферным моделям. Яркостная температура пикселя определяется по обратной функции Планка  $T_B = B^{-1}(\lambda, I_R)$ . Результаты моделирования показывают, что разработанная методика интеркалибровки в области высоких температур ( $\sim 290 \text{ К}$ ) работоспособна при балле облачности  $n_0 < 0,3$ . При больших баллах найти ЯТ, соответствующих безоблачной погоде, одновременно в измерениях обоих приборов невозможно.

В разделе 2.3 описано применение разработанной методики к реальным измерениям 5 и 6 ИК каналов радиометра МСУ-МР и каналам 10.8 мкм и 12.0 мкм радиометра SEVIRI. Выбранный район интеркалибровки находится в области подспутниковой точки КА Meteosat ( $0^\circ$  в. д., с. ш.) и ограничен 5 градусами по широте и долготе. При отборе сравниваемых данных соблюдаются следующие условия: измерения отличаются не более чем на 10 минут, косинус зенитного угла  $ZA$  направления визирования из пикселя на спутника  $\cos ZA \geq 0,9$ ). Выбор из множества данных пикселей однородной морской поверхности (без облачности) проводится упорядочиванием пикселей ЯТ в порядке возрастания (рисунок 1).

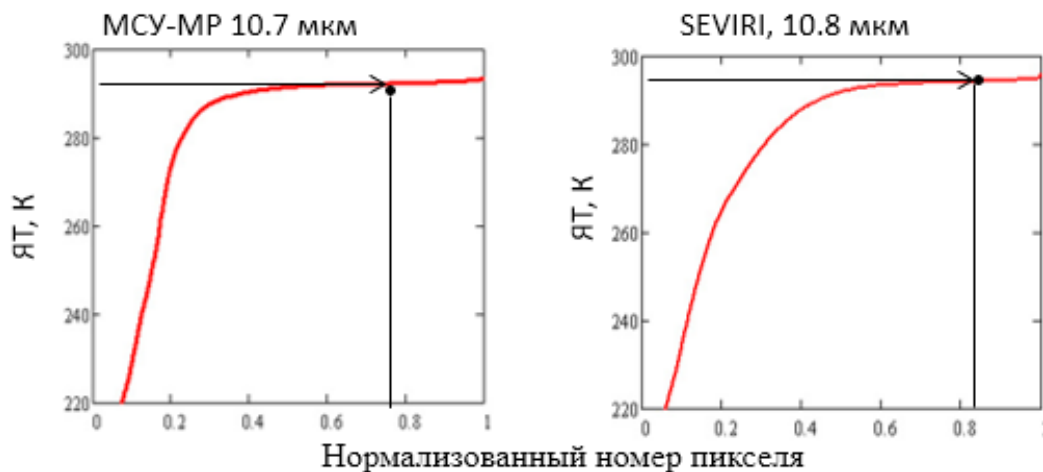


Рисунок 1 - Сравнение измерений ЯТ морской поверхности в аналогичных ИК каналах МСУ-МР и SEVIRI

Средины (отмечены точками) слабо меняющихся линейных участков справа на графиках соответствуют ЯТ однородной морской поверхности.

Валидация измерений ИК каналов МСУ-МР КА Метеор-М №2 в области низких температур ( $\sim 230$  К) проводилась сравнением измерений температуры воздуха  $T_m$  на высоте 2 м на метеорологической обсерватории Нэви-Оперейтед (о. Гренландия,  $72^\circ 17'$  с.ш.,  $38^\circ 48'$  з.д.; 3195 м) с вычисленными температурами в центральных пикселях строки сканирования МСУ-МР в районе станции. Выбирались дни с температурой воздуха ниже  $-30^\circ\text{C}$ , когда влияние водяного пара на регистрируемую ЯТ не превышает 0,2 К.

Коэффициенты калибровки в диапазоне между 290 К и 230 К определяются как коэффициенты прямой линии, соединяющей «холодную» и «горячую» точки. Проведенная проверка по всему диапазону ЯТ над территорией Гвинейского залива для однородных (по температуре) атмосферных сцен показала уменьшение медианного смещения ЯТ МСУ-МР относительно SEVIRI с -1,6 К до -0,4 К.

Применение этой методики для МСУ-МР КА Метеор-М №2-2 позволило улучшить точность определения температуры поверхности Мирового океана. Как показала Е. А. Фролова, после учета результатов интеркалибровки значительно (с 2-3 К до  $\sim 1$  К) уменьшилось расхождение в спутниковых оценках с буйковыми измерениями, используемыми в качестве эталонных.

В разделе 2.4 описана методика и приведены результаты интеркалибровки фурье-спектрометра ИКФС-2, устанавливаемого на полярно-орбитальные КА серии Метеор-М, по данным SEVIRI. Для интеркалибровки используется район Гвинейского залива. Выбираются центральные пиксели строки сканирования фурье-спектрометра и пиксели SEVIRI, косинусы зенитных углов  $ZA$  наблюдения на спутник которых  $\cos(ZA) \geq 0,996$ . Один пиксель ИКФС-2 (35 км) замещается пикселями SEVIRI (3 км). Однородность получаемых фрагментов проверяется по среднеквадратическому отклонению пикселей SEVIRI – оно не должно превышать 0,2 К для каналов 7.3, 8.7, 9.7, 10.8, 12.0 мкм и 0,3 К в канале 13.4 мкм.

В основе методики интеркалибровки лежит сравнение измеренных фурье-спектрометром интенсивностей уходящего ИК излучения  $R_{\text{ИКФС}}$ , свернутых с САФ SEVIRI, и данных измерений ИК каналов радиометра SEVIRI. В рабочей полосе длин волн любого канала SEVIRI находится не менее 400

спектральных каналов ИКФС-2. Таким образом, имитированный сигнал в ИК канале сканера будет вычислен как  $R_{им}^* = \frac{1}{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{ИКФС}(\lambda) \cdot f_k(\lambda) d\lambda$ , где  $f_k(\lambda)$  – САФ канала сканера SEVIRI,  $N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_k(\lambda) d\lambda$  – норма  $f_k(\lambda)$ ,  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы канала сканера. Интенсивности излучения  $R_{им}^*$  пересчитываются в ЯТ по формуле Планка. Далее определяются разности  $\Delta ЯТ$  между рассчитанными ЯТ и ЯТ, непосредственно измеренными SEVIRI. Таким образом получены калибровочные коэффициенты для ИКФС-2, соответствующие спектральным диапазонам ИК каналов SEVIRI: 7.3 мкм – 0,234 К, 8.7 мкм – -0,096 К, 9.7 мкм – 0,153 К, 10.8 мкм – 0,081 К, 12.0 мкм – 0,002 К, 13.4 мкм – -0,044 К.

**Третья глава** посвящена методикам интеркалибровки аппаратуры МСУ-ГС, устанавливаемой на КА серии Электро-Л, по измерениям приборов на полярно-орбитальных и геостационарных КА. Описан способ оценки реального пространственного разрешения ИК каналов МСУ-ГС. В **разделе 3.1** приведена методика интеркалибровки МСУ-ГС КА Электро-Л №1, запущенного в точку стояния  $76^\circ$  в. д. в 2011 году. В качестве эталонных данных привлекались измерения зондировщика AIRS (The Atmospheric Infrared Sounder), установленного на борту полярно-орбитального спутника EOS/Aqua и имеющего 2 378 инфракрасных каналов в ИК диапазоне спектра. В основе методики лежит сравнение измеренных интенсивностей уходящего излучения в каналах AIRS, свернутых с САФ ИК каналов МСУ-ГС, и непосредственно измеренных МСУ-ГС. Интеркалибровка проводилась только в области высоких температур ( $\sim 290$  К), так как линейность амплитудной функции, определяющей зависимость величины интенсивности излучения и выходного сигнала ИК канала сканера МСУ-ГС, обеспечивалась в ходе наземной калибровки и контролировалась по измерениям телеметрических датчиков температуры фотоприемников на борту КА. Отбирались пиксели ЯТ, зенитный угол визирования на каждый спутник которых не превышал 5 градусов. Разница по времени между проведением измерений полярно-орбитального и геостационарного КА не превышала 10 минут. Пиксели AIRS ( $\sim 13$  км) и МСУ-ГС ( $\sim 4$  км) отличаются по пространственному разрешению, а вероятность попадания облака или суши в пиксель увеличивается при увеличении размера пикселя. Для нахождения середин «плоских» участков ЯТ

пикселей, упорядоченных по возрастанию и отвечающих за морскую однородную поверхность, применялся подход, аналогичный изложенному в разделе 2.3. Проверка методики была выполнена на примере интеркалибровки ИК каналов радиометра SEVIRI и AIRS. Средние смещения ЯТ SEVIRI относительно измерений, вычисленных по данным AIRS, хорошо совпали с опубликованными результатами сопоставления измерений AIRS и SEVIRI, IASI и SEVIRI.

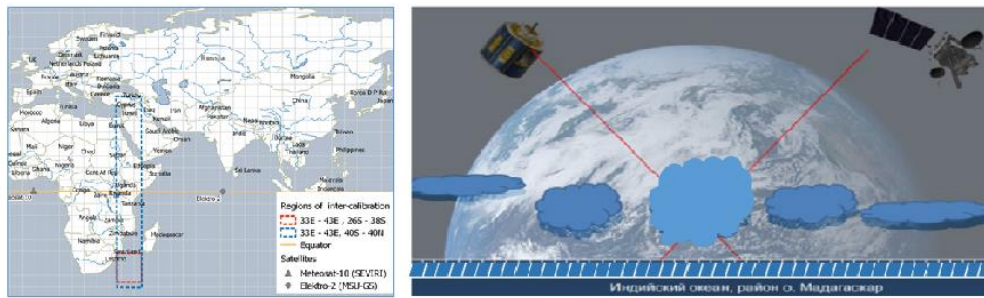
**Раздел 3.2** посвящен описанию методики интеркалибровки ИК каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №2 с использованием эталонных измерений аналогичных каналов радиометра SEVIRI. После запуска в декабре 2015 года КА Электро-Л №2 в точку стояния  $76^\circ$  в. д. было обнаружено, что радиационный холодильник МСУ-ГС работает в нештатном режиме и не может обеспечить температуру 78 К, необходимую для правильного функционирования фотоприемников. Это привело к тому, что аппаратные функции ИК каналов радиометра, связывающие выходной сигнал и величину интенсивности излучения, изменились. Они оказались отличными от полученных во время наземной калибровки и непостоянными во времени. Оценить величину калибровочных коэффициентов во всем диапазоне ЯТ, а также проследить их возможный суточный или межсуточный ход позволяет интеркалибровка с использованием измерений соседнего геостационарного радиометра в течение каждого сеанса измерений МСУ-ГС. Разработка методики проводилась для 9-го канала МСУ-ГС и аналогичного канала 10,8 мкм SEVIRI.

Район интеркалибровки выбирался посередине между КА Электро-Л №2 и Meteosat-10 вблизи долготы  $38^\circ \pm 3^\circ$  в. д. По широте район ограничен  $\pm 43^\circ$ . Суть методики заключается в нахождении одних и тех же однородных сцен на изображениях двух КА и сравнении их ЯТ. Получаемые при сканировании в ИК каналах МСУ-ГС и SEVIRI пиксели ЯТ располагаются в ячейках постоянной широтно-долготной сетки, индивидуальной для каждого радиометра. Размер сетки SEVIRI составляет  $3712 \times 3712$  ячеек, МСУ-ГС –  $2784 \times 2784$ . Отбор однородных фрагментов изображения осуществляется по СКО ЯТ пикселей от среднего значения 9 элементов ( $3 \times 3$ ) матрицы, центрированной относительно

пикселя с индексами  $\{i, j\}$ :  $\sqrt{\frac{\sum_{k=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 (T_{i+k, j+n} - m_{ij})^2}{9-1}} < \sigma_h$ , где  $m_{ij}$  – средняя ЯТ матрицы,  $\sigma_h$  – пороговое значение СКО, которое выбирается отдельно для каждого

радиометра ( $\sigma_{МСУ}=2$  К,  $\sigma_{SEV}=3,4$  К). СКО для пикселей SEVIRI, почти в полтора раза превышающее СКО для пикселей МСУ-ГС, объясняется более высоким пространственным разрешением SEVIRI. Выбор таких пороговых значений обеспечивает примерное равенство ( $\pm 2\%$ ) количества однородных фрагментов.

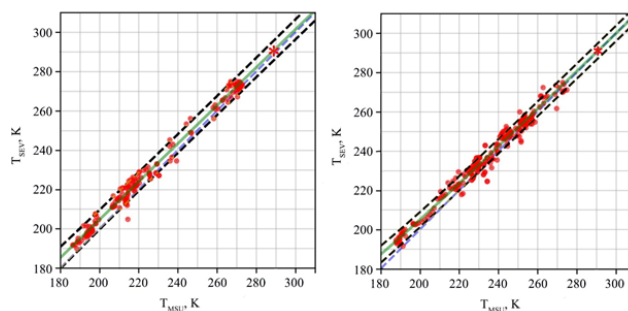
Для интеркалибровки в области низких температур необходимо выявить однозначное соответствие ЯТ выбранных облачных сцен на разных изображениях. Облачный параллакс (рисунок 2) приводит к тому, что одно и то же облако, наблюдаемое двумя КА, имеет разные координаты на их широтно-долготных сетках. При этом разница в положении облака может достигать 30-40 км. По этой причине для устранения неоднозначности в сравниваемые пары для каждой строки матрицы отбираются только минимальные ЯТ МСУ-ГС и SEVIRI.



**Рисунок 2 - Район интеркалибровки и иллюстрация к понятию «облачный параллакс»**

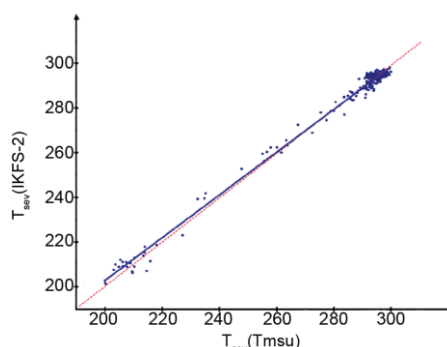
Для интеркалибровки в области температур выше 275 К используется анализ максимумов ЯТ однородных (с пороговым значением  $\sigma_h = 0,5$ К) сцен океанической поверхности в отсутствии облаков.

Примеры регрессий, полученных во время сеансов измерений 27 апреля и 7 мая 2018 года в 14:30 UTC, приведены на рисунке 3. Звездочкой на графике показана  $T_{\text{макс}}^{\text{MSU}}$  для океанической поверхности в районе о. Мадагаскар. Черным пунктиром выделены границы 95-процентного доверительного интервала.



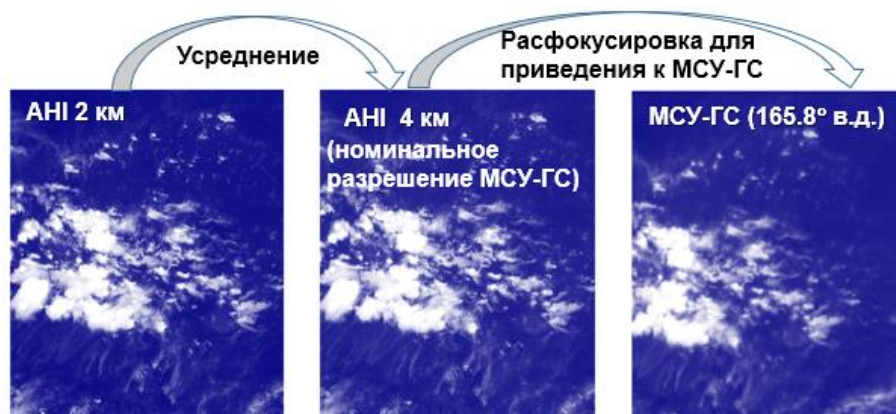
**Рисунок 3 - Калибровочные регрессии для 9-го канала МСУ-ГС**

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 ЯТ пикселей МСУ-ГС, попадающих в поле зрения ИКФС-2, не превышало 3 К. Обе оценки  $T_{SEV}(T_{msu})$  и  $T_{SEV}(ИКФС-2)$  хорошо согласуются во всем рассматриваемом интервале температур (рисунок 4). Коэффициент корреляции  $R=0,9$ , среднее значение и стандартное отклонение смещения между оценками равны  $0,2\pm0,14К$ .



**Рисунок 4 - Сравнение оценок ЯТ SEVIRI с использованием измерений ИКФС-2**

**Раздел 3.3** посвящен описанию способа оценки пространственного разрешения ИК каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №3, запущенного 24 декабря 2019 года в точку  $165,8^\circ$  в. д. Интеркалибровку МСУ-ГС предполагалось проводить по ранее разработанной схеме с использованием измерений радиометра АНИ японского геостационарного КА Himawari-8. Линейный размер пикселя ИК каналов АНИ составляет 2 км, МСУ-ГС – 4 км. Для приведения изображений в ИК каналах двух радиометров к единому пространственному разрешению данные АНИ усреднялись по квадратной матрице из четырех соседних пикселей (рисунок 5).



**Рисунок 5 - Синхронные изображения МСУ-ГС и АНИ, 19 мая 2020 года**

Так как облака на изображениях МСУ-ГС все еще выглядели более размытыми чем на загрубленном изображении АНІ, то оно расфокусируется далее в соответствии с квадратной матрицей  $M$ , размером  $5 \times 5$  пикселей ( $k, n$ ). Элементы матрицы  $M$  рассчитываются на основе Гауссовой функции  $G(\sigma)$  с параметром расфокусировки  $\sigma$ . Непосредственно для вычисления элементов  $M_{k,n}$  используется выражение  $M_{k,n} = G_n^k(\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * \exp\left[-\left(\frac{n^2+k^2}{2\sigma^2}\right)\right]$ .

В качестве критерия сходства изображений МСУ-ГС и АНІ использовалось количество границ облаков, выделенных пороговым методом по модулю разности ЯТ в двух соседних пикселях  $\left|ЯТ_{i,j} - ЯТ_{i+1,j}\right| > ЯТ_h$  или  $\left|ЯТ_{i,j} - ЯТ_{i,j+1}\right| > ЯТ_h$ , где  $ЯТ_h = 10$  К. Параметр расфокусировки  $\sigma$  выбирается при условии

минимизации критерия  $F(\sigma) = \sqrt{\left(\frac{N_{xH}}{N_{xE}} - 1\right)^2 + \left(\frac{N_{yH}}{N_{yE}} - 1\right)^2} = \min$ , где  $N_{xE}$  и  $N_{yE}$

– нормированное количество выделенных границ облаков МСУ-ГС,  $N_{xH}$  и  $N_{yH}$  – нормированное количество выделенных границ облаков в расфокусированном изображении АНІ. Тогда эффективный размер пикселя  $D_{eff}$  (или реальное пространственное разрешение) находится усреднением по площади функции расфокусировки  $G(\sigma)$ . При интегрировании по радиусу  $R$  найдем, что

$$D_{eff} = 2 * \frac{\int_0^L R^2 G(\sigma) dR}{\int_0^L G(\sigma) R dR}, \text{ где верхний предел интегрирования } L \sim 20 \text{ км.}$$

Валидация способа, подтвердившая его работоспособность, проводилась путем сравнения пространственного разрешения идентичных геостационарных радиометров АНІ и корейского АМІ (КА GeoKompSat-2A), а также радиометров МСУ-ГС КА Электро-Л №2 и SEVIRI КА Meteosat -11.

Применение способа во время летных испытаний КА Электро-Л №3 показало, что пространственное разрешение МСУ-ГС в канале 10,7 мкм на конец мая 2020 г. составило  $\sim 8$  км. После проведения коррекции программно-математического обеспечения разработчиками аппаратуры пространственное разрешение улучшилось до  $\sim 5,4$  км. После перевода КА Электро-Л №3 в точку  $76^\circ$  в. д. осуществлялась интеркалибровка по ранее разработанной методике для двух геостационарных КА с использованием измерений радиометра АМІ соседнего корейского КА GeoKompSat-2A. Выявлен суточный ход калибровочных



зависимостей для каналов №9 и №10 МСУ-ГС, амплитуда которого достигает 4 К в области низких температур и  $\sim 0,5$  К в области высоких.

В **разделе 3.4** приводится оценка качества информации, получаемой с радиометра МСУ-ГС, и ее применимость в задачах гидрометеорологии. Оценка полноты решения тематических задач по данным МСУ-ГС проводилась путем установления соответствия качества решения этих задач требованиям ВМО. При этом базовыми берутся показатели радиометров SEVIRI и ABI, показатели тематических продуктов системы валидационных подспутниковых наблюдений НИЦ «Планета», а в качестве оценки выступают значения шкалы желательности Харрингтона, устанавливающей соответствие между субъективными градациями и численными показателями. Анализ показывает, что данные МСУ-ГС могут быть оценены как удовлетворительные и хорошие для определения температуры поверхности моря (наукастинг), температуры поверхности суши (численный прогноз погоды - ЧПП), температуры верхней границы облачности (климат), векторов ветра (ЧПП), а также после сужения спектрального диапазона канала 9,7 мкм общего содержания озона (ЧПП). Основные ограничения при этом связаны с недостаточным пространственным разрешением ИК каналов.

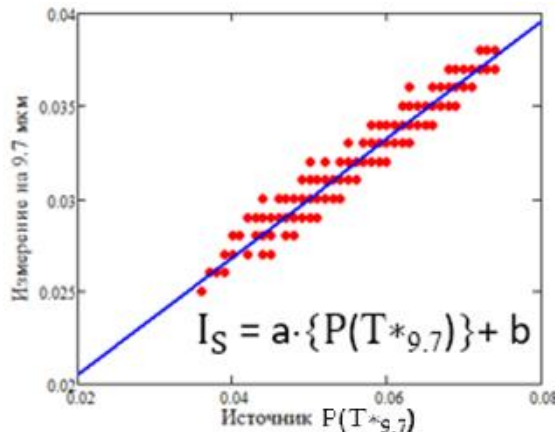
**Глава 4** посвящена методикам определения газового состава атмосферы по измерениям в ИК области спектра российской аппаратурой МСУ-ГС и ИКФС-2. В **разделе 4.1** приводится сравнение совмещения ИК каналов МСУ-ГС и аналогичных зарубежных радиометров. Стандартная ошибка линии регрессии, построенной по измерениям в канале 9,7 мкм и канале окна прозрачности атмосферы 10,8 мкм, для МСУ-ГС составляет порядка 3-5 К в отличие от зарубежных сканеров (0,5 К - 0,7 К). К тому же канал 9,7 мкм МСУ-ГС намного шире полосы поглощения озона и его измерения на данный момент использовать для оценок не представляется возможным. В **разделе 4.2** описана методика определения общего содержания озона по измерениям в ИК каналах геостационарного радиометра SEVIRI – аналога МСУ-ГС. Суть методики 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:

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

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

излучения поверхности, облака, рассчитанная по формуле 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  $\tau = -\ln \left[ \frac{I_S - I_{Cl}}{P(T_S) - P(T_{Cl})} \right]$ . При этом в оценку  $\tau$  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  $T_{9,7}^*$ .



**Рисунок 6 – Интенсивность излучения, регистрируемая от источника и измеренная в «озонном» канале в пикселях для одного выделенного района земного шара**

Как следует из рисунка 6,  $\tau$  может быть найдена как натуральный логарифм коэффициента  $a$  линейной регрессии измерений в канале 9,7 мкм и интенсивности излучения источника  $\tau = -\ln(a)$ . В свою очередь  $T_{9,7}^*$  определяется по измерениям в «расщепленном окне прозрачности» атмосферы:

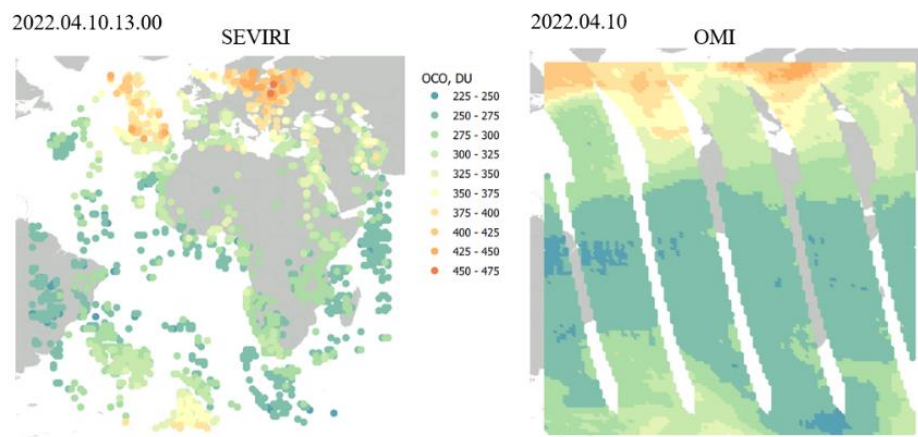
$$T_{9,7}^* = T_{10,8} + \alpha_0(T_{10,8} - T_{12,0}),$$

где  $\alpha_0 = 0,63$  – эмпирический коэффициент, полученный функцией минимизации ошибок при пересчете ЯТ из одного ИК канала в другой.

В качестве эталонных данных общего содержания озона использовались измерения спутниковой аппаратуры Ozone Monitoring Instruments (OMI). Оптическая толщина  $\tau$  по измерениям в каналах SEVIRI рассчитывалась в ячейках градусной сетки. Одна ячейка содержала не менее 100 пикселей SEVIRI. По результатам обработки измерений за нескольких дней 2020 года (20 января, 7 марта, 18 апреля, 29 мая и 23 июня) была найдена регрессионная зависимость

$$KOZ_{sev} = \frac{180 * \tau^{1.9}}{1 + \beta * \sec(ZA)} + 188.4, \text{ где } \beta = 0,08 \text{ – эмпирический коэффициент.}$$

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 7 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 7 - Оценка общего содержания озона по измерениям в ИК канале SEVIRI (слева) и OMI (справа), 2022.04.10**

**Раздел 4.3** посвящен описанию методики определения общего содержания диоксида углерода по измерениям российского фурье-спектрометра ИКФС-2. В основе разработанной методики также лежит поиск регрессионной зависимости между рассчитанными эффективными оптическими толщинами атмосферы  $\tau$  в нескольких каналах ИКФС-2 и количеством диоксида углерода. Оптическая толщина  $\tau$  определяется по измерениям ИКФС-2 в диапазоне 11 – 14 мкм, который захватывает ИК окно прозрачности атмосферы и коротковолновое крыло полосы поглощения  $CO_2$  15 мкм. В качестве эталонных данных использовались измерения концентрации  $CO_2$  на высотной мачте научной обсерватории ZOTTO,

расположенной в Центральной Сибири (Красноярский край, Туруханский район). На мачте ZOTTO проводятся постоянные измерения концентрации диоксида углерода с абсолютной точностью  $0,25 \text{ млн}^{-1}$ . Использование в качестве предикторов регрессии эффективных оптических толщин  $\tau$  позволяет создать алгоритм, работающий в условиях облачности. Оптические толщины определяются для каждого  $i$ -го пикселя и  $j$ -ого канала ИКФС-2:  $\tau_{i,j} = \ln(\varepsilon) - \ln\left(\frac{R_{i,j}}{R_{T_{i,j}}}\right) \cos(Z_i)$ , где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения земной поверхности в соответствии с известной классификацией IGBP типов земной поверхности или облака с  $\varepsilon=1$ ;  $R_{i,j}$  – интенсивность регистрируемого ИКФС-2 излучения в  $i$ -м пикселе в  $j$ -м канале,  $R_{T_{i,j}}$  – расчетная (по функции Планка) интенсивность излучения абсолютно черного тела с температурой  $T$ ;  $T$  – яркостная температура, измеренная в канале ИКФС-2 с частотой  $\nu_0=900,1 \text{ см}^{-1}$ ;  $Z_i$  – зенитный угол оси визирования КА из пикселя.

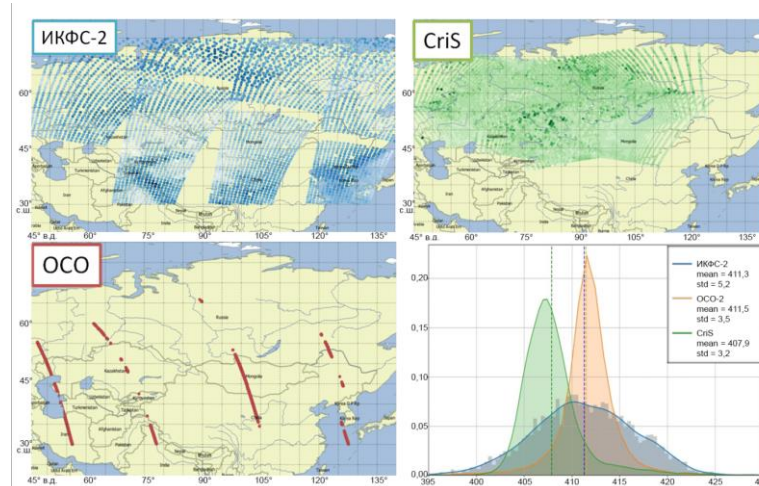
Найденные таким образом значения  $\tau_{i,j}$  корректируются для учета количества диоксида углерода, находящегося ниже верхней границы облаков. Предполагается, что концентрация молекул  $\text{CO}_2$  в этом слое постоянна. Тогда оптическая толщина  $x_{i,j}$   $\text{CO}_2$  во всем атмосферном столбе (от подстилающей поверхности до верхней границы атмосферы):  $x_{i,j} = \frac{P_0}{P_T} \cdot \tau_{i,j}$ , где  $P_0$  – давление у поверхности Земли, а  $P_T$  – давление на верхней границе облачности с температурой  $T$ . Профили давления и температуры представляют собой выходные продукты глобальной прогностической системы GFS NCEP. Поправка на высоту излучающего слоя приводит к выравниванию оптических толщин между различными пикселями ИКФС-2.

Измерения на мачте 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  $\text{CO}_2$  была одинаковой с точностью до  $1 \text{ млн}^{-1}$ . Это позволяло исключить завышение средних концентраций  $\text{CO}_2$ , связанных с его накоплением при температурной инверсии. Пересчет измеренных объемных концентраций на общее содержание в столбе выполнялся интегрированием вертикального профиля концентрации  $\text{CO}_2$  по

давлению с учетом вертикальных профилей температуры и влажности из GFS NCEP. Исходя из результатов, полученных сотрудниками томского Института оптики атмосферы СО РАН профиль концентрации  $\text{CO}_2$  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 за 2015 – 2016 гг.

Общее содержание диоксида углерода по данным ИКФС-2 рассчитывается с помощью полинома второго порядка  $C_i = w_0 + \sum_{j=1}^k [w_j \cdot x_{i,j} + w_{j+k} \cdot x_{i,j}^2]$ , где  $w_0$  и  $w_j$  - коэффициенты регрессии,  $C_i$  - эталонные  $\text{XCO}_2$ ,  $x_{i,j}$  - 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  $\nu_0 = 900,1 \text{ см}^{-1}$ . Выбор подходящих каналов ИКФС-2 осуществлялся по минимальной дисперсии отклонения от линии регрессии при анализе остаточной суммы квадратов  $D = C^T C - W^T X^T C$ , где  $W$  – вектор значений  $w_0, w_j, w_{j+k}$ .

В качестве предикторов используются оптические толщины  $x_{i,j}$ , рассчитанные по измерениям в пяти каналах ИКФС-2. Для валидации (рисунок 8) использовались измерения ИК фурье-спектрометра CrIS КА NOAA-20 и спектрометра ОСО КА ОСО-2, регистрирующего солнечное отраженное излучение. Измерения ОСО проводятся только в безоблачных условиях. Средние значения общего содержания  $\text{CO}_2$  по данным ИКФС-2 хорошо (в пределах  $2,3 \text{ млн}^{-1}$ ) совпадают с оценками ОСО.



**Рисунок 8 - Измерения общего содержания  $\text{XCO}_2$  (17 октября 2021 г.) по данным ИКФС-2 (а), CrIS (б) и ОСО (в) и гистограммы распределения оценок**

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

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

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

Разработана методика интеркалибровки ИК каналов сканера 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 сканеров. Постоянно проводимая калибровка позволяет оценить суточный ход смещения для различных ЯТ.

Создан способ определения реального пространственного разрешения ИК каналов сканера МСУ-ГС. На конец мая 2020 года пространственное разрешение в канале 10,7 мкм МСУ-ГС КА Электро-Л №3 составляло ~ 8 км. После коррекции программно-математического обеспечения разработчиками аппаратуры пространственное разрешение равно ~ 5,4 км.

Разработана методика оценки общего содержания озона по измерениям ИК каналов геостационарных сканеров. 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<sup>-1</sup>.

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

### Список публикаций автора в рецензируемых изданиях

1. **Kiseleva, Y. V.** Data intercalibration technique for infrared channels of the Elektro-L/MSU-GS imager with the AIRS infrared sounder data / Y.V. Kiseleva, A.V. Kuharsky, A. N. Rublev, A. B. Uspensky, Y. M. Gektin, A. A. Zaytsev // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2016. – Т. 52. – № 9. – С. 1181-1190..

2. Козлов, А. А. Оценки погрешности бортовой радиометрической калибровки ИК-зондировщика ИКФС-2 по данным сканера SEVIRI / А. А. Козлов, Д. А. Козлов, Ф. С. Завелевич, **Ю. В. Киселева**, И. А. Козлов, А. В. Кухарский, А. Н. Рублев, А. Б. Успенский, И. С. Черкашин // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2016. – Т. 13. – №6. – С. 264-272.

3. Филей А. А. Оценка точности результатов температурно-влажностного зондирования атмосферы спутникового фурье-спектрометра ИКФС-2 / А. А. Филей, А. Н. Давиденко, **Ю. В. Киселева**, Д. А. Козлов, Е. И. Холодов // *Метеорология и гидрология.* – 2019. – № 3. – С. 110-117.

4. 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.

5. Rublev, A. N. Inter-calibration of infrared channels of geostationary meteorological satellite imagers / A. N. Rublev, E. V. Gorbarenko, V. V. Golomolzin, E. Y. Borisov, **J. V. Kiseleva**, Y. M. Gektin, A. A. Zaitsev // *Frontiers Environmental Science.* – 2018.

6. Timofeyev, Y. M. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on «METEOR-M» No. 2 – four years in orbit / Y. M. Timofeyev, A. V. Polyakov, Y. A. Virolainen, A. B. Uspensky, A. N. Rublev, A. V. Kukharsky, **J. V. Kiseleva**, F. S. Zavelevich, D. A. Kozlov, I. A. Kozlov, A. G. Nikulin, V. P. Pyatkin, E. V. Rusin // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* – 2019. – vol. 238. – Art.106579.

### Другие публикации

1. **Киселева, Ю. В.**, Рыжаков, А. В., Козлов, Д. А., Рублев, А. Н. Контроль калибровки ИК каналов сканера 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.
2. **Киселева, Ю. В.**, Рублев, А. Н., Филей, А. А. Сравнительная оценка качества измерений в спектральных каналах сканеров геостационарных спутников гидрометеорологического назначения // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. 2019. С.141.
3. **Киселева, Ю. В.** Определение общего содержания озона по данным измерений радиометров геостационарных гидрометеорологических космических аппаратов / Ю. В. Киселева, А. Н. Рублев // Тезисы докладов Восьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: ВНИИЭМ, 2020. – 78 с.
4. **Киселева, Ю. В.** Система интеркалибровки отечественных спутниковых приборов гидрометеорологического назначения и валидации информационных продуктов / Ю. В. Киселева // Тезисы докладов Восьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО ВНИИЭМ. 2021. [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=597:2015-02-20-08-39-11&catid=77:2015-02-19-13-41-50&Itemid=108](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=597:2015-02-20-08-39-11&catid=77:2015-02-19-13-41-50&Itemid=108).
5. **Киселева, Ю. В.**, Рублев, А. Н., Голомолзин, В. В. Проведение интеркалибровки и оценка пространственного разрешения инфракрасных каналов сканеров геостационарных спутников серии Электро-Л // Сборник тезисов «Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2021)». Санкт-Петербург. 2021. С.16.
6. Rublev, A. N. On-orbit calibration of Russian satellite instruments: New issues /, A. N. Rublev, **Ju. V. Kiseleva**, A. B. Uspensky, V. V. Golomolzin, D. R. Gayfulin, M. D. Tsyruльников // GSICS Quarterly Spring Issue 2021. – Volume 15. – No. 1.
7. 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.
8. Filei, A. A. Radiometric inter-calibration between MSU-GS and VIIRS shortwave channels / A. A. Filei, A. N. Rublev, **Yu. V. Kiseleva** // GSICS Quarterly: Winter Issue, 2018. – 2018b. – Vol. 12. – No. 1. – P. 13-15.