

Авиамоторная, д. 53, Москва, 111250, почтовый адрес: а/я 16, г. Москва, 111250
тел.: +7 495 673-94-30, факс: +7 495 509-12-00, www.spacecorp.ru, contact@spacecorp.ru
ОКПО 11477389 ОГРН 1097746649681 ИНН 7722698789 КПП 774550001

от 29.05.2022 № РКС 9-92

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального
директора по науке
АО «Российские космические системы»
доктор технических наук

____ А.В. Круглов

____ 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Киселевой Юлии Викторовны** по теме
**«Интеркалибровка отечественных спутниковых радиометров и
определение содержания газовых составляющих атмосферы»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук
по специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы»

Одним из направлений решения задач в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды является создание международной группировки космических аппаратов (КА), используемой для оперативного гидрометеорологического обеспечения, контроля опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций, мониторинга климатических изменений и загрязнений окружающей среды. Входящие эту группировку отечественные гидрометеорологические КА серий «Метеор-М», «Электро-Л», «Арктика-М» имеют в своем составе спектрозональные оптические приборы видимого и инфракрасных (ИК) диапазонов. Создание и поддержание системы интеркалибровки бортовой аппаратуры КА на орбите, соответствующей мировому уровню, является необходимым условием для совместного целевого

использования отечественных и зарубежных космических комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Такая система расширяет возможности практического использования данных этих комплексов и позволяют их применять в рамках международного обмена космической гидрометеорологической информации.

Наряду с оперативной гидрометеорологией возрастает роль спутниковой информационной продукции в климатических и экологических исследованиях. Особое внимание при этом уделяется контролю содержания оптически активных газов, оказывающих сильное влияние на жизнедеятельность человека: озона и углекислого газа.

В связи с этим **актуальность** темы диссертации, связанной с разработкой методик интеркалибровки ИК-каналов отечественной бортовой аппаратуры на орбите, а также новых способов определения содержания озона и углекислого газа по их данным существующих или новых российских КА сомнений не вызывает.

Научная новизна работы состоит в разработке новых методик интеркалибровки ИК-каналов отечественных радиометров МСУ-МР, устанавливаемых на полярно-орбитальные КА серии «Метеор-М», и МСУ-ГС, устанавливаемых на геостационарные КА серии «Электро-Л». Впервые для установления суточного хода амплитудных характеристик ИК-каналов МСУ-ГС геостационарного КА «Электро-Л» №3 интеркалибровке предшествует оценка их пространственного разрешения на основе сопоставления получаемых изображений с изображениями со сканеров японского и корейского геостационарных КА, номинальное пространственное разрешение которых в два раза выше разрешения МСУ-ГС.

Новой является методика оценки общего содержания озона только по измерениям ИК-каналов сканеров геостационарных КА в условиях разорванной облачности. Впервые разработана методика и получены оценки общего содержания углекислого газа в атмосфере по данным российского фурье-спектрометра ИКФС-2 КА серии «Метеор-М».

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в расширении границ предметной области физики атмосферы по результатам разработки новых методик интеркалибровки ИК-каналов радиометров и оценки общего содержания озона и углекислого газа. Диссертационная работа направлена на развитие следующего пункта паспорта научной специальности

25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»: 1. Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в использовании разработанных методик для интеркалибровки 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.

Достоверность результатов исследований подтверждается математическим моделированием спутниковых измерений в ИК-области электромагнитного спектра, результатами анализа реальных измерений и использованием апробированных методов статистической обработки. Автором проведена валидация получаемых оценок общего содержания озона и углекислого газа по независимым спутниковым измерениям.

Результаты диссертации внедрены в ФГБУ «НИЦ «Планета» в систему валидационных подспутниковых наблюдений для интеркалибровки ИК-каналов многозональных спектральных устройств МСУ-МР и МСУ-ГС во время летных испытаний и эксплуатации на орбите.

Основные выводы и результаты исследований докладывались на российских и международных научных конференциях, опубликованы в 16 работах, в том числе 4 в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией. Автором получено 2 свидетельства Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературных источников из 98 наименований. Текст диссертации изложен на 113 машинописных страницах, содержит 51 рисунок и 11 таблиц.

Во введении автором обоснована актуальность диссертационной работы, приведен анализ степени разработанности темы, сформулированы цели и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены научная новизна и практическая ценность.

В первой главе дано краткое описание различных методик интеркалибровки спутниковой ИК-аппаратуры гидрометеорологических КА на различных орбитах. Автором проведен анализ большого количества работ, в котором рассмотрены различные аспекты интеркалибровки (выбор района, масштаб пространственного усреднения, учет различий спектральных функций

и т.п.). Даны основные характеристики гидрометеорологической аппаратуры, установленной на КА серий «Метеор-М» и «Электро-Л». Показаны возможности и ограничения существующих методик интеркалибровки применительно к отечественным приборам.

Во второй главе рассмотрены методики интеркалибровки ИК-аппаратуры полярно-орбитальных КА «Метеор-М» №2 и №2-2. На основе моделирования спутниковых измерений в малооблачных условиях в районе экватора и сопоставления реальных спутниковых измерений разработана методика интеркалибровки ИК-каналов МСУ-МР по соответствующим каналам сканера SEVIRI европейского геостационарного КА «Meteosat-10» или «Meteosat-11». В главе содержится также описание методики интеркалибровки фурье-спектрометра ИКФС-2 на основе сравнения измеренных им спектральной плотности энергетической яркости, проинтегрированной в каналах SEVIRI с учетом их аппаратных спектральных функций, и энергетической яркости, измеренной самим SEVIRI.

В третьей главе приведены разработанные методики интеркалибровки аппаратуры МСУ-ГС КА серии «Электро-Л» по измерениям приборов на полярно-орбитальных и геостационарных КА. Особый интерес представляют интеркалибровки по зарубежным геостационарным КА: европейским «GeoKompSat-2A» с однотипными сканерами АНІ и АМІ соответственно. Для интеркалибровки ИК-каналов МСУ-ГС КА «Электро-Л» № 3 предварительно используется оценка их пространственного разрешения. Например, в точке стояния КА «Электро-Л» № 3 76° в. д. по результатам сопоставления его измерений с измерениями сканера АМІ соседнего корейского геостационарного КА «GeoKompSat-2A» установлено, что реальное пространственное разрешение каналов № 9 и № 10 МСУ-ГС $\sim 5,4$ км. Суточный ход амплитудной функции каналов оценивается в 4К в области низких (~ 200 – 220 К) температур и $\sim 0,5$ К в области высоких (290–300 К). В третьей главе разработана методика оценки полноты решения тематических задач по данным МСУ-ГС КА серии «Электро-Л». Основу методики составляет установление соответствия качества решения этих задач требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО). Для количественной оценки качества используется обобщенная функция желательности Харрингтона, устанавливающая соответствие между экспертными субъективными предпочтениями и численными значениями

желательности. Применение методики к основным базовым тематическим задачам, решаемым по информации с геостационарных КА, показало, что сканер МСУ-ГС КА «Электро-Л» № 3 удовлетворительно или хорошо решает все задачи в отличие от сканера МСУ-ГС КА «Электро-Л» № 2, по данным которого из-за отсутствия информации в ИК-канале № 10, предназначенном для компенсации паразитного влияния водяного пара, невозможно определять с надлежащей точностью температуру поверхности океана.

В четвертой главе излагаются методики определения общего содержания озона и углекислого газа по данным измерений аппаратуры МСУ-ГС КА серии «Электро-Л» и фурье-спектрометра ИКФС-2 КА «Метеор-М» № 2. Анализ данных ИК-каналов МСУ-ГС показал, что из-за неточного пространственного совмещения ИК-каналов и широкого рабочего спектрального диапазона «озонного» канала № 8 МСУ-ГС, самостоятельно, без привлечения дополнительной априорной информации, этот прибор для определения содержания озона использоваться не может. В связи с этим методика определения общего содержания озона разрабатывалась на основе использования регрессионной зависимости между эффективной оптической толщиной атмосферы, вычисленной по измерениям радиометра SEVIRI геостационарного КА «Meteosat-11», и общим содержанием озона. Для получения регрессии в качестве эталона использовались измерения прибора OMI (Ozone Monitoring Instruments) КА США «Aura». Методика по определению общего содержания углекислого газа также основана на использовании регрессионной зависимости между эффективными оптическими толщинами, вычисляемыми в каналах фурье-спектрометра ИКФС-2, и оценками содержания CO₂ по измерениям на высотной мачте Института леса СО РАН в Центральной Сибири, а также с привлечением результатов измерений метеорологической обсерватории у вершины вулкана Мауна-Лоа на острове Гавайи, США.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Материал диссертационной работы представляется вполне последовательным, логичным и аргументированным, изложен понятным литературным языком. В целом, работа выполнена на достаточно высоком научном уровне. Основное содержание работы, результаты и выводы достаточно полно изложены в автореферате.

В качестве **замечаний** к работе следует отметить что:

В обзоре, приведенном в первой главе, отсутствуют известные способы количественной оценки пространственного разрешения радиометров, знание которых требуется автору для проведения радиометрической калибровки ИК-каналов геостационарных сканеров.

В третьей главе работы отсутствуют результаты сопоставления оценок пространственного разрешения ИК-каналов МСУ-ГС КА «Электро-Л» №3 с подобными оценками АО «Российские космические системы», полученными в ходе летных испытаний этого КА.

В четвертой главе работы уделено очень мало внимания сужению спектрального диапазона канала № 8 аппаратуры МСУ-ГС. Явным образом не описано, что автором выданы разработчику соответствующие рекомендации, на основании которых принято Решение Госкорпорации «Роскосмос» № МХ-1040-р от 16.09.2021 по соответствующей доработке аппаратуры. Таким образом, п. 5 практической значимости работы раскрыт в тексте работы недостаточно полно.

Неясно происхождение и неочевиден физический смысл формулы (3.7).

Также следует отметить не всегда строгое использование автором терминов и обозначений физических величин.

Есть замечания редакционного характера, главным из которых является отсутствие промежуточных выводов в конце каждой главы, которые давали бы краткое изложение основных полученных в ней результатов. Также необходимо отметить плохо читаемые рисунки 1.1, 1.6 и 1.7.

Однако приведенные замечания в целом не снижают научного уровня и практической значимости рассматриваемой диссертационной работы.

Представленные в работе методики интеркалибровки рекомендуется использовать в дальнейшем при работе с данными отечественных ИК-радиометров КА серий «Метеор-М» и «Электро-Л», в т. ч., в ходе летных испытаний и штатной эксплуатации новых КА этих серий. Разработанные методики определения концентраций малых газовых компонент атмосферы рекомендуется использовать при создании соответствующих тематических продуктов.

В качестве рекомендации относительно дальнейших исследований автору предлагается расширить разработанную методику интеркалибровки аппаратуры МСУ-ГС геостационарных КА серии «Электро-Л» на высокоэллиптические КА серии «Арктика-М».

Вывод: Диссертация Киселевой Ю.В. по теме «Интеркалибровка отечественных спутниковых радиометров и определение содержания газовых составляющих атмосферы», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы» имеет научную ценность, теоретическую и практическую значимость, является завершённой научно-квалификационной работой.

Работа выполнена на значительном фактическом материале с использованием современных методов исследований, соответствует цели, задачам и основной теме диссертации. Результаты исследований автор иллюстрирует таблицами и рисунками, внимательно и детально анализирует полученные данные. Основные выводы, изложенные в заключении, логичны и полностью основаны на результатах проведённых исследований.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов, содержанию и оформлению рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9–14 действующего Положения о порядке присуждения учёных степеней, а её автор Киселева Юлия Викторовна заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы».

Данный отзыв одобрен на заседании Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» (протокол заседания секции НТС по системам ДЗЗ от 28 июля 2022г. № 05/03).

Директор проектов по созданию систем ДЗЗ
кандидат технических наук

В.А. Селин

Заместитель начальника отделения
создания целевых приборов ДЗЗ –
главный конструктор направления
кандидат технических наук

Ю.М. Гектин

Начальник сектора системного проектирования
и информационного сопровождения
многозональных сканирующих устройств

А.А. Зайцев

Начальник сектора программно-математического обеспечения
кандидат физико-математических наук

Л.А. Гришанцева

Ведущий инженер-программист
сектора комплексных исследований,
разработки и внедрения методов и средств ДЗЗ

К.И. Жуковская

Учёный секретарь
АО «Российские космические системы»
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

С.А. Федотов