

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Юшкова Владимира Александровича

на диссертационную работу Киселевой Юлии Викторовны

«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

В диссертации Киселевой Ю. В. представлен обзор методик интеркалибровки (т.е. поверки по референсному прибору во время эксплуатации) инфракрасных (ИК) приборов метеорологических спутников, находящихся на полярных и геостационарных орбитах. С учетом проведенного анализа зарубежного опыта и результатов математического моделирования измерений спутниковой аппаратуры при различных баллах облачности автором разработаны собственные методики интеркалибровки ИК каналов отечественных радиометров, установленных на спутниках серии «Метеор-М» и «Электро-Л». Подробное исследование влияния различных факторов на точность измерений ИК каналов спутниковых приборов позволило диссертанту создать методики определения общего содержания озона и углекислого газа, работоспособность которых подтверждена сопоставлением с результатами независимых измерений. В этих методиках использование априорных прогностических данных о состоянии атмосферы играет незначительную роль по сравнению с самими результатами спутниковых измерений, помогая определить условия применения разработанных алгоритмов, но не оказывая непосредственного влияния на величину оценок содержания газов, получаемых с их помощью. С этой точки зрения методики автора выгодно отличаются от аналогичных зарубежных и отечественных методик, в которых априорная информация при определении содержания газов является значимой.

Актуальность представленной диссертационной работы определяется тем, что в современных методах усвоения данных в прогностических моделях спутниковая информация играет ключевую роль. Только она может обеспечить глобальный охват различных районов земного шара и высокую частоту измерений. В последнее десятилетие создана группировка отечественных гидрометеорологических спутников на полярных и геостационарных орбитах. В феврале 2021 г. впервые в мире запущен гидрометеорологический спутник «Арктика-М» №1 на высокоэллиптическую орбиту.

Мониторинг точности и стабильности радиометрических характеристик отечественных спутниковых приборов на орбите в течение всего срока их существования на орбите является важной и актуальной задачей. Без этого будет невозможна ассимиляция получаемых с их помощью данных в прогностических моделях. Актуальным также является подход, продемонстрированный диссертантом при разработке методик определения содержания озона и углекислого газа в облачной атмосфере.

Цель диссертации заключалась в разработке методик интеркалибровки ИК каналов измерительных приборов, установленных на полярно-орбитальных серии «Метеор-М» и геостационарных (серии «Электро-Л») космических аппаратах для обеспечения возможности определения параметров атмосферы, включая общее содержание газовых составляющих, и подстилающей поверхности.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 98 наименования. Общий объем диссертации составляет 113 страниц. Диссертация содержит 51 рисунок и 11 таблиц.

Во **Введении** обозначена цель и дано обоснование актуальности диссертационной работы; определен круг решаемых задач; сформулированы выносимые на защиту положения; отмечены научная новизна и практическая значимость результатов; приведены сведения о личном вкладе автора, достоверности и апробации разработанных методик и способов.

В **Первой главе** проведен анализ существующих методик интеркалибровки зарубежных ИК радиометров по эталонным спутниковым приборам. Приведены основные принципы пространственно-временного сопоставления измерений поверяемого и референсного спутниковых приборов, сформулированные международной рабочей группой *Глобальной космической системы по интеркалибровке* (Global Space-based Inter Calibration System – GSICS) с учетом различий в спектральном разрешении сравниваемых приборов. Перечислены основные характеристики радиометров российских метеорологических спутников, проводящих измерения в ИК области спектра. Рассмотрена система валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН), в состав программного обеспечения которой входят разработанные автором разработанные алгоритмы и методики. Дается структура сайта СВПН, на котором регулярно представляются результаты ведущихся интеркалибровок и валидации основных информационных продуктов, а также обеспечен удаленный доступ к архиву спутниковых измерений.

Во **Второй главе** описаны методики интеркалибровки сканирующих радиометров МСУ-МР и фурье-спектрометра ИКФС-2, установленных на российских полярно-орбитальных спутниках серии «Метеор-М». В качестве референсного прибора используются ИК каналы радиометра SEVIRI, устанавливаемого на европейских геостационарных спутниках серии «Meteosat». На основе трехмерного моделирования спутниковых измерений в условиях кучевой облачности оцениваются, в частности, условия применимости предложенной методики интеркалибровки радиометров МСУ-МР по измерениям SEVIRI в области высоких температур. Следует отметить, что использование результатов интеркалибровки для МСУ-МР спутника «Метеор-М» №2 при определении температуры поверхности океана позволило существенно повысить точность получаемых оценок.

Содержание **Третьей** главы составляют результаты интеркалибровки ИК каналов радиометров МСУ-ГС, установленных на геостационарных метеорологических спутниках серии «Электро-Л». В силу особенностей конструкции и фактических режимов работы прибора на различных спутниках серии в диссертации последовательно дается описание трех методик его интеркалибровки. Первая методика (не выносится на защиту) предполагает «классический» вариант интеркалибровки, широко используемый группой GSICS, когда рабочий прибор на геостационарном космическом аппарате проверяется по референсному прибору – американскому спектрометру AIRS, установленному на полярно-орбитальном спутнике EOS/Aqua. В двух других защищаемых методиках, предназначенных для выявления и учета возможного суточного хода радиометрических характеристик отечественного радиометра, в качестве референсного прибора используются аналоги – многоканальные радиометры, расположенные на геостационарных спутниках. Во второй методике при интеркалибровке автором успешно преодолеваются сложности, обусловленные облачным параллаксом, когда координаты одних и тех же облаков в верхних слоях тропосферы, определенные с различных геостационарных спутников, существенно отличаются. В третьей методике попутно с возможностью проведения интеркалибровки для выявления суточного хода калибровочных констант разработана оригинальная методика оценки пространственного разрешения ИК каналов отечественного радиометра МСУ-ГС путем выявления границ облаков и сопоставления их количества с аналогичными оценками по данным приборов с заведомо лучшим пространственным разрешением. В третьей главе также приводится описание методики и результаты обобщенной оценки качества решения различных гидрометеорологических задач

отечественных радиометров, установленных на геостационарных спутниках Электро-Л №2 и №3, в сравнении с их зарубежными аналогами. Показано, что основным недостатком МСУ-ГС Электро-Л № 2 является неработоспособность канала, используемого для учета влияния водяного пара. Основными недостатками МСУ-ГС Электро-Л № 3, преодолеваемыми в процессе эксплуатации на орбите, являются худшее пространственное разрешение и полосы на изображениях земного диска в ИК каналах.

В **Четвертой** главе представлены две методики определения общего содержания озона и углекислого газа в атмосфере по спутниковым данным. В основе обеих методик лежат регрессии, выбор предикторов которых основан на упрощенных физических моделях генерации и переноса собственного ИК излучения атмосферы и подстилающей поверхности с использованием понятия «эффективной оптической толщины». Для определения общего содержания озона в настоящее время используются данные радиометра SEVIRI европейского геостационарного спутника Meteosat-11. Как показано в диссертации, отечественный аналог – радиометр МСУ-ГС на спутнике Электро-Л №3 не может использоваться из-за худшего совмещения полей зрения спектральных каналов и большой спектральной ширины «озонового» (9,7 мкм) канала МСУ-ГС, которая примерно в три раза превосходит полосу поглощения озона. Методика определения общего содержания углекислого газа (диоксида углерода) основана на использовании результатов измерений ИК фурье-спектрометра ИКФС-2, установленного на российском полярно-орбитальном спутнике Метеор-М №2.

В качестве референсных данных для построения регрессий в обеих методиках используются данные реальных измерений. Валидация методик выполнена путем сопоставления получаемых оценок содержания газов с оценками, полученными по данным других приборов.

Новая разработанная методика позволяет определить общее содержание озона при наличии облачности и без использования прогностического профиля.

В **Заключении** перечислены основные результаты исследования.

Научная новизна представленных результатов состоит в создании методического аппарата и программно-математического комплекса, обеспечивающих интеркалибровку ИК приборов российских метеорологических спутников во время эксплуатации их на орбите. Новой является разработка двух методик определения общего содержания озона и углекислого газа, в которых построение регрессий основано на упрощенных физических

моделях генерации и переноса собственного ИК излучения атмосферы и подстилающей поверхности.

Как следует из текста диссертации и автореферата, **личный вклад** соискателя в эти разработки, а также в подготовку и написание статей по данной тематике достаточно велик.

Достоверность полученных результатов по интеркалибровке подтверждается их практическим использованием для контроля работоспособности ИК каналов спутниковых приборов во время проведения летных испытаний и эксплуатации на орбите. Методики определения общего содержания озона и углекислого газа прошли валидацию по независимым данным. Основные результаты работы опубликованы в научных журналах, докладывались и обсуждались на международной рабочей группе GSICS, а также доступны российским и зарубежным специалистам через вебсайты ФГБУ «НИЦ «Планета».

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методики интеркалибровки позволяют получать калибровочные зависимости в широком диапазоне измеряемых температур, а применительно к геостационарным приборам - выделять суточный ход их радиометрических характеристик. В плане практического применения представленных методик следует отметить, что разработанные автором методики интеркалибровки уже в настоящее время внедрены в оперативную деятельность ФГБУ «НИЦ «Планета». Результаты доступны на сайте Центра <http://planet.rssi.ru/calval/>. Интерактивная карта общего содержания углекислого газа по дням для территории России ведется на сайте <http://onir.rcpod.space/>.

На программы интеркалибровки, созданные на основе разработанных методик, получено два свидетельства о государственной регистрации в Роспатенте. На основе рекомендаций автора для определения общего содержания озона по измерениям новых геостационарных спутников серии «Электро-Л» будет выполнено сужение рабочего спектрального диапазона ИК канала радиометра МСУ-ГС вблизи полосы поглощения озона вблизи 9.7 мкм.

Оценки содержания газов в различных географических регионах, полученные по методикам авторов, могут представлять большую научную ценность для усвоения в моделях прогноза погоды и оценке климатических изменений в качестве новой, независимой информации, а также для практического применения в современных задачах декарбонизации.

Положения, выносимые на защиту, находят развернутое и аргументированное подтверждение в тексте диссертационной работы, а также в 14 публикациях, 4 из которых изданы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в действующем перечне Высшей аттестационной комиссией (ВАК), 6 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций. Результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях по профилю диссертации.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Существенные недостатки в диссертации отсутствуют. Вместе с тем следует отметить, что при изложении ряда вопросов автор излишне лаконичен. Например, он не приводит каким образом выполнена параметризация результатов полинейных расчетов с помощью известной программы LBLRTM для получения функции пропускания атмосферы при моделировании спутниковых измерений в условиях кучевой облачности. Нет пояснений как получена формула (3.13) для оценки пространственного разрешения радиометра. Результаты валидации определения содержания озона приведены только указанием среднеквадратической невязки (20 ед. Добсона) полученной регрессии в течение четырех дней 2020 года с результатами спутникового спектрометра OMI американского спутника Aura, которые непосредственно использовались при построении этой регрессии. В качестве подтверждения работоспособности регрессии на независимых данных для 10 апреля 2022 г. используется лишь сходство оценок, полученных автором, с результатами OMI, оцениваемое визуально по рисунку 4.5 без каких-либо количественных оценок.

Диссертация написана хорошим литературным языком, но есть несколько редакционных замечаний. Автор ввел в употребление новый глагол «замащивать», которого нет в словаре русского языка. Было бы полезно объяснить его значение в тексте диссертации, так как автор планирует его активно использовать в работе по интеркалибровке спутниковых приборов с различным пиксельным разрешением.

Автор под интеркалибровкой понимает поверку по «эталонному» спутниковому прибору непосредственно на орбите. Правильнее было бы использовать слово «референсный» вместо слово «эталонный». Уместно напомнить, что эталон – это мера или измерительный прибор, служащий для воспроизведения, хранения и передачи единиц какой-либо величины.

При выборе полигонов для процедуры интеркалибровки выбираются места с однородностью их структуры. Почему при этом таким полигоном выбрана Курская степь?

На рисунке 2.14 на графике спектральной функции каналов не указаны, каким спутникам принадлежат представленные спектральные функции и не обозначена ось ординат.

В разделе 3.2 «Интеркалибровка МСУ-ГС/Электро-Л №1 по данным зондировщика AIRS» упоминается про использовании довольно старой модели US1976, которой более 50 лет. Почему не использовались более современные модели атмосферы (в том числе российские), в которых учтены наблюдаемые температурные тренды?

В Заключение приводится простой перечень полученных автором результатов, в который почему-то не вошла разработка методики для оценки полноты решения тематических задач по данным геостационарных спутников серии Электро-Л (раздел 3.4) в сравнении с зарубежными аналогами. После некоторых формул (например, 2.7, 3.5, 3.13, 4.2, 4.3) нет знаков препинаний. В подписи к формуле (2.7) вместо используемого волнового числа указана длина волны. Подрисуночная подпись к рисунку 4.1 относится только к его правой части.

В целом, диссертационная работа «Интеркалибровка отечественных спутниковых радиометров и определение содержания газовых составляющих атмосферы», соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842), а ее автор Киселева Юлия Викторовна безусловно заслуживает присуждение ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.,
Заведующий отделом физики высоких
слоев атмосферы ФГБУ «ЦАО»



Юшков Владимир Александрович

Дата 16 августа 2022 г.

ФГБУ «Центральная Аэрологическая Обсерватория»
141707, г. Долгопрудный, Московской области
ул. Первомайская, д. 3.
+7 (495) 408-61-48
<http://www.cao-rhms.ru/>
secretary@cao-rhms.ru

Подпись Юшкова В. А. заверяю



Ученый секретарь ФГБУ «ЦАО»