

Отзыв

официального оппонента на диссертацию **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.

Основной целью диссертационной работы Ю.В. Киселевой является разработка и практическая реализация методик интеркалибровки инфракрасных каналов отечественных спутниковых радиометров, а также создание методик определения общего содержания озона и диоксида углерода в атмосфере по спутниковым измерениям уходящего инфракрасного (ИК) излучения.

Важность интеркалибровки целевой аппаратуры российских (серий Метеор-М, Электро-Л, Арктика-М) и зарубежных метеоспутников объясняется необходимостью контроля и коррекции бортовой радиометрической калибровки и повышения достоверности результатов дистанционного атмосферного зондирования (в т. ч. оценок содержания озона и диоксида углерода в атмосфере). Поэтому исследования диссертанта, направленные на создание работоспособных методик интеркалибровки ИК-каналов спутниковых радиометров (с использованием отечественных и зарубежных эталонных приборов) и повышение достоверности спутниковой информационной продукции, являются несомненно актуальными и своевременными.

Рассмотрим содержание диссертационной работы Ю.В. Киселевой, которая состоит из Введения, 4-х глав, Заключение и списка литературы из 98 наименований. Общий объем работы составляет 113 страниц, включая 51 рисунок и 11 таблиц.

Во **Введении** автор определяет объект и цели исследования, приводит краткий обзор работ по теме диссертации, анализирует степень разработанности исследования, а также дает сводку полученных результатов, отмечая их научную новизну и практическую значимость. Описаны личный вклад автора, достоверность, апробация результатов и публикации по теме диссертационного исследования.

Первая глава диссертации обзорно-аналитического характера посвящена обзору работ за рубежом и в России по интеркалибровке целевой аппаратуры (инфракрасных (ИК) радиометров) космических

аппаратов (КА) гидрометеорологического назначения. В **разделе 1.1** описана созданная по инициативе ВМО «Глобальная космическая система интеркалибровки (Global Space - based Inter-Calibration System – GSICS)», а также выполнен анализ существующих и рекомендованных GSICS методик интеркалибровки ИК-каналов радиометров по эталонным приборам. Обсуждается применимость этих методик интеркалибровки к радиометрам, входящим в полезную нагрузку КА серии Метеор-М и Электро-Л. В **разделе 1.2** приведены характеристики радиометров МСУ-МР, ИКФС-2 и МСУ-ГС, устанавливаемых на метеорологических КА серии Метеор-М и Электро-Л соответственно. **Раздел 1.3** содержит описание созданной в 2016 году в НИЦ «Планета» системы валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН), в которой реализованы методики и алгоритмы интеркалибровки, разработанные диссертантом. Результаты функционирования СВПН (в частности, данные о состоянии российских спутниковых приборов) регулярно предоставляются на заседаниях рабочих групп GSICS и размещаются на сайте НИЦ «Планета».

Предмет **второй главы** - разработанные автором методики интеркалибровки ИК-каналов радиометров МСУ-МР и ИКФС-2 полярно-орбитальных КА серии Метеор-М по данным радиометра SEVIRI европейского геостационарного КА Meteosat-10. В **разделе 2.1** исследовано влияние различия спектральных аппаратных функций (САФ) ИК каналов SEVIRI и МСУ-МР на результаты интеркалибровки. С помощью моделирования спутниковых измерений (для чего использована известная программа полинейных расчетов LBLRTM) показано, что выбор эффективной длины волны λ для каждого из сравниваемых каналов позволяет практически полностью исключить влияние различий САФ на результаты интеркалибровки. **Раздел 2.2** посвящен моделированию спутниковых измерений над морской поверхностью в условиях разорванной облачности и теоретическому обоснованию разработанной методики интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-МР по данным аналогичных каналов SEVIRI. В **разделе 2.3** описано применение разработанной методики для интеркалибровки 5-го и 6-го ИК каналов радиометра МСУ-МР и каналов 10.8 мкм и 12.0 мкм радиометра SEVIRI. Приводятся результаты интеркалибровки (калибровочные коэффициенты), использование которых

значительно уменьшает медианное смещение измерений МСУ-МР относительно SEVIRI. В разделе 2.4 рассмотрена методика интеркалибровки фурье-спектрометра ИКФС-2, устанавливаемого на КА серии Метеор-М, по данным радиометра SEVIRI. Для интеркалибровки используется район Гвинейского залива, а основу предложенной методики составляет сравнение измеренных с помощью ИКФС-2 спектров уходящего ИК излучения, свернутых с САФ ИК каналов SEVIRI, и данных измерений SEVIRI. Приводятся результаты интеркалибровки - калибровочные коэффициенты для ИКФС-2, соответствующие спектральным ИК каналам SEVIRI.

В третьей главе (самой большой по объему – 34 стр.) приведены материалы исследований по методикам интеркалибровки аппаратуры МСУ-ГС, устанавливаемой на КА серии Электро-Л, и измерений целевой аппаратуры полярно-орбитальных и геостационарных КА. В разделе 3.1 рассмотрена методика интеркалибровки ИК каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №1 (точка стояния 76°в.д.) и эталонных измерений атмосферного зондировщика AIRS (The Atmospheric Infrared Sounder) с полярно-орбитального спутника EOS/Aqua (2378 каналов в ИК диапазоне спектра). Измеренные в каналах AIRS интенсивности уходящего ИК излучения свертываются с САФ ИК каналов МСУ-ГС и, в отличие от раздела 2.4, используются как эталонные при сравнении с измерениями МСУ-ГС в ИК каналах. Раздел 3.2 посвящен описанию методики интеркалибровки ИК каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №2 и эталонных измерений в аналогичных каналах радиометра SEVIRI. Отработка методики проводилась на данных 9-го канала МСУ-ГС и аналогичного канала SEVIRI (10,8 мкм) «соседних» геостационарных КА Электро-Л №2 и Meteosat-10. Предложены процедуры нахождения одних и тех же однородных «горячих» и «холодных» атмосферных сцен на изображениях двух КА. В разделе 3.3 рассмотрен оригинальный способ оценки реального пространственного разрешения ИК каналов МСУ-ГС КА Электро-Л №3 (запущен 24 декабря 2019 г. в точку 165,8°в.д.). Необходимость такой оценки вызвана использованием в качестве эталонов для интеркалибровки измерений в ИК каналах радиометров АНИ и АМИ, установленных на соседних японском и корейском геостационарных КА и имеющих более высокое пространственное разрешение (2 км в подспутниковой точке). В разделе 3.4 обсуждается полнота решения

тематических задач по данным МСУ-ГС, включая оценку качества информационной продукции, получаемой по данным радиометра МСУ-ГС, и ее применимость в задачах гидрометеорологии. Для этого проверялось соответствие качества решения тематических задач требованиям ВМО. Анализ, выполненный с использованием т. н. шкалы желательности Харрингтона, показывает, что данные МСУ - ГС могут быть оценены как удовлетворительные и хорошие для получения разных видов информационной продукции, в том числе температуры поверхности моря, температуры верхней границы облачности, векторов ветра и др. Основные ограничения при этом связаны с недостаточным пространственным разрешением ИК каналов.

В четвертой главе представлены созданные диссертантом методики тематической обработки данных измерений аппаратуры МСУ-ГС / Электро-Л и ИКФС-2 / Метеор-М для определения газового состава атмосферы - общего содержания озона и диоксида углерода. **В разделе 4.1** на основе сравнения результатов пространственного совмещения ИК каналов, а также различия САФ «озонных» каналов МСУ-ГС и аналогичных зарубежных радиометров сделан вывод о непригодности измерений МСУ-ГС для дистанционного определения содержания озона. **В разделе 4.2** описана методика определения общего содержания озона по измерениям в ИК каналах радиометра SEVIRI – аналога МСУ-ГС. Основу методики составляет нахождение регрессионной связи между эффективной оптической толщиной атмосферы и количеством озона, причем в качестве эталонных значений количества озона использовались данные спутниковой аппаратуры OMI (Ozone Monitoring Instruments). **Раздел 4.3** посвящен описанию новой методики определения общего содержания диоксида углерода по измерениям российского фурье-спектрометра ИКФС-2. По аналогии с разделом 4.1 в основе методики лежит поиск регрессионной зависимости между эффективными оптическими толщинами атмосферы τ , рассчитанными для нескольких каналов ИКФС-2, и количеством диоксида углерода. Оптическая толщина τ определяется по измерениям ИКФС-2 в 5 каналах (диапазон 11 – 14 мкм), а в качестве эталонных данных использовались измерения концентрации CO_2 на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO. Достоинством созданной методики является то, что она сохраняет работоспособность при наличии облачности в поле зрения прибора.

В **Заключении** суммированы основные результаты диссертационной работы, из которых, по нашему мнению, можно выделить следующие:

1. Разработана методика интеркалибровки инфракрасных каналов радиометра МСУ-МР КА серии Метеор-М с использованием измерений в ИК каналах радиометра SEVIRI / Meteosat и наблюдений за температурой воздуха на наземных станциях в Гренландии и/или Антарктиде.
2. Выполнена интеркалибровка фурье-спектрометра ИКФС-2 по данным измерений в ИК каналах радиометра SEVIRI с геостационарных КА серии Meteosat.
3. Разработаны методики интеркалибровки ИК каналов радиометра МСУ-ГС КА Электро-Л №1 по данным измерений атмосферных зондировщиков с полярно-орбитальных КА и измерениям в ИК каналах радиометров – аналогов МСУ-ГС, установленных на зарубежных геостационарных КА (с учетом реального пространственного разрешения калибруемых и эталонных спутниковых данных).
4. Разработана методика оценки общего содержания озона в атмосфере по измерениям в ИК каналах радиометров – аналогов МСУ-ГС с зарубежных геостационарных метеоспутников при наличии облачности в поле зрения прибора и без использования априорной информации (прогностических данных) о вертикальном профиле температуры в пунктах зондирования. Эксперименты по применению методики для картирования полей озона на основе данных измерений радиометра SEVIRI/Meteosat-10 подтвердили ее работоспособность.
5. Разработана и реализована новая методика оценки общего содержания диоксида углерода в атмосфере по измерениям фурье-спектрометра ИКФС-2 в условиях наличия и отсутствия облачности.

Научная новизна работы заключается в создании методик интеркалибровки ИК каналов радиометров МСУ-МР/Метеор-М и МСУ-ГС/Электро-Л с использованием эталонных спутниковых измерений. Разработанные автором методики оценки общего содержания озона в атмосфере по данным измерений радиометров – аналогов МСУ-ГС зарубежных геостационарных метеоспутников и оценки общего содержания диоксида углерода в атмосфере по измерениям фурье-спектрометра ИКФС-2 также являются новыми.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении комплексов алгоритмов и программ интеркалибровки ИК каналов радиометров МСУ-МР/Метеор-М и МСУ-ГС/Электро-Л, а также фурье-спектрометра ИКФС-2, обеспечивших проведение летных испытаний и эксплуатации спутниковой целевой аппаратуры. На основе методических исследований принято Решение МХ-1040-р от 16.09.2021 г. о корректировке границ спектрального канала №8 МСУ-ГС для КА серий «Электро-Л» и «Арктика-М» и обеспечен регулярный выпуск карт общего содержания диоксида углерода для территории России по данным фурье-спектрометра ИКФС-2.

Достоверность разработанных методик интеркалибровки подтверждается подробным анализом условий измерений, учетом режимов работы поверяемых и эталонных приборов, валидацией результатов по независимым источникам. Достоверность результатов определения общего содержания озона и диоксида углерода подтверждается их удовлетворительным согласованием с имеющимися независимыми данными и их публикацией в рецензируемых российских научных журналах.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Автор, безусловно, проделал большую и качественную работу по разработке методов и подходов к интеркалибровке отечественных спутниковых радиометров. При этом решен ряд достаточно сложных задач фактически «попиксельного» сопоставления данных различных спутниковых систем. В то же время сегодня имеются уже достаточно хорошо разработанные методы решения подобных задач путем сопоставления гистограмм наблюдений, полученных различными спутниковыми системами. Эти методы позволяют в ряде случаев избежать большого числа проблем, возникающих при «попиксельном» сопоставлении данных. К сожалению, в работе даже в обзорной ее части не анализируются возможности использования упомянутых методов сопоставления гистограмм.

2. Для валидации получаемых в работе оценок общего содержания озона диссертант в том числе использует данные, полученные на основе измерений аппаратуры OMI и SEVIRI. В то же время нельзя не отметить, что сегодня общее содержание озона в атмосфере также

восстанавливается и по данным прибора TROPOMI, который позволяет это делать с более высоким пространственным разрешением, чем упомянутые выше приборы. Продукты, получаемые на основе данных прибора TROPOMY, также находятся в последние годы в открытом доступе. Поэтому непонятно, почему автор не использовал их в работе.

3. Следует отметить, что автору не удалось избежать ряда неточностей и редакционных погрешностей. Например:

- одна и та же целевая аппаратура в тексте именуется по-разному, а именно, «радиометр», «ИК радиометр», «сканер»;
- на стр. 68 радиометр АНІ ошибочно приписан к китайскому (а не к японскому) геостационарному КА;
- в Списке литературы продублирована одна и та же статья (№ 88 и № 98).

В то же время следует отметить, что представленные замечания не оказывают существенного влияния на общий достаточно высокий уровень работы.

Результаты диссертационной работы 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.

Диссертация Ю.В. Киселевой выполнена на достаточно высоком научном уровне и является самостоятельным законченным исследованием. Сделанные выше замечания не затрагивают существа работы и не подвергают сомнению достоверность полученных результатов. В целом, автор провел большой объем численных и методических исследований. Автореферат диссертации и опубликованные работы достаточно полно отражают ее содержание.

Диссертационная работа Ю.В. Киселевой соответствует паспорту специальности 25.00.29. Содержание диссертации, выдвинутые научные положения, сформулированные выводы и опубликованные работы дают основания заключить, что диссертация Ю.В. Киселевой «Интеркалибровка отечественных спутниковых радиометров и определение содержания газовых составляющих атмосферы» является законченной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям пп. 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842), а ее автор Киселева Юлия Викторовна заслуживает присвоения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Заместитель директора ИКИ РАН,
доктор технических наук



Е.А. Лупян

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)

117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32