

Интеркалибровка бортовых инфракрасных фурье-спектрометров SI-1 и ИКФС-2

Д. А. Козлов¹, Ф. С. Завелевич¹, Ю. М. Тимофеев²,
А. В. Поляков², И. А. Козлов¹, И. С. Черкашин¹

¹ *Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Москва, 125438, Россия*
E-mail: dima_kozlov@mail.ru

² *Санкт-Петербургский государственный университет*
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Изучение климатических изменений на основе анализа спектров уходящего ИК-излучения, регистрируемых различной спутниковой аппаратурой, требует тщательного определения состояния взаимной калибровки спектрометрических приборов. В настоящей работе проведена интеркалибровка фурье-спектрометров SI-1 (спутники «Метеор-28» и «Метеор-29», 1977 и 1979 гг.) и ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2, в штатной эксплуатации с 2015 г.), необходимая для уточнения полученных авторами ранее результатов по изменению ИК-спектров атмосферы за прошедшие 40 лет. В виду невозможности проведения прямых (синхронных) сопоставлений был применён метод двойных разностей, при этом в качестве опорных принимались результаты расчётов спектров уходящего излучения SI-1 и ИКФС-2 на основе данных аэрологического радиозондирования и данных о содержании углекислого газа в атмосфере, полученные с использованием известного радиационного кода высокого качества LBLRTM. Было определено, что как среднее, так и стандартное отклонение для двойных разностей SI-1 и ИКФС-2 после выборки наиболее достоверных измерений не превышают $1\text{--}2 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$ почти во всём рассматриваемом спектральном диапазоне $660\text{--}1350 \text{ см}^{-1}$, что свидетельствует о хорошем согласовании взаимной калибровки двух приборов.

Ключевые слова: инфракрасный фурье-спектрометр, спутниковая аппаратура, измерение спектров атмосферы, интеркалибровка, метод двойных разностей, ИКФС-2, SI-1

Одобрена к печати: 19.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-72-80

Введение

В ряду основных проблем современной науки о Земле наиболее значимыми являются изменение климата планеты, исследование факторов, его определяющих, и прогнозирование климата на ближайшие десятилетия. Важную роль в изучении климатических изменений играет анализ спектров уходящего теплового излучения Земли, получаемых спутниковой аппаратурой. Анализируя результаты измерений ИК-спектров атмосферы, разделённых значительными временными промежутками (десятками лет), можно получать информацию об изменении параметров и состава атмосферы, необходимую в том числе для изучения изменений радиационного баланса планеты. Примеры использования измерений спектров уходящего теплового излучения разных лет для исследований климатических изменений приведены в работах (Bantges, Brindley, 2016; Griggs, Harries, 2007; Goody et al., 1998; Harries et al., 2001).

Среди особенностей изучения изменений климата планеты по спутниковым измерениям атмосферы следует выделить следующее:

- 1) поскольку средний срок активного существования спутниковой аппаратуры (как правило, от 5 до 10 лет) значительно меньше интересующего временного интервала наблюдений (десятки лет), то почти всегда приходится иметь дело с измерениями, полученными различными приборами на различных космических аппаратах;
- 2) поскольку изучаемые климатические изменения параметров и состава атмосферы относительно малы (в частности, как правило, существенно меньше сезонной и широт-

ной изменчивости), то при анализе изменений в ИК-спектрах требуется очень тщательное исключение всех мешающих (неклиматических) факторов.

Данные обстоятельства, в свою очередь, определяют следующие условия к проведению процедуры исследования (см., например, работу (Anderson et al., 2004)):

- 1) необходимость взаимного пересчёта спектров двух приборов (приведение спектров одного из приборов к спектрам другого) с учётом различий в характеристиках фурье-спектрометров, включая:
 - согласование спектрального разрешения спектров, измеренных разными приборами (в идеале — согласование спектральных аппаратных функций приборов, т.е. функций спектрального отклика на входное монохроматическое излучение);
 - согласование пространственного разрешения измерений приборов (в идеале — согласование функций угловой чувствительности приборов, учитывающих неравномерность чувствительности в пределах поля зрения);
- 2) необходимость согласования условий наблюдения, включая пространственное (по долготе и широте), геометрическое (по углу визирования) и временное (здесь — в сезонном смысле) согласование измерений двух приборов;
- 3) необходимость проведения тщательной интеркалибровки (взаимной калибровки) приборов; по большому счёту, здесь нет необходимости в абсолютной привязке к измерениям общепризнанного референсного прибора-эталона, но требуется, по крайней мере, исключение взаимной погрешности радиометрической калибровки используемых спектрометров.

Выполнение данных условий (или принятие мер по минимизации влияния каждого из факторов) позволяет на основе анализа временных (за десятки лет) изменений спектров теплового излучения атмосферы выделить информацию об изменении параметров и состава атмосферы, а следовательно, и климатических изменений на Земле.

В работе (Тимофеев и др., 2018) при сравнениях измерений уходящего теплового излучения приборами SI-1 (спутники «Метеор-28» и «Метеор-29», 1977 и 1979 гг.) и ИКФС-2 (космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2, в штатной эксплуатации с 2015 г.) были приняты соответствующие усилия для согласования характеристик приборов и условий наблюдения (условия 1 и 2 выше), но не исследовалось состояние взаимной калибровки приборов (условие 3). Для того чтобы повысить достоверность и уточнить полученные результаты об изменении за 40 лет средних величин уходящего теплового ИК-излучения (в частности, в полосе CO₂ вблизи 15 мкм), в данной работе приведены методика и результаты взаимной калибровки приборов SI-1 (Kemper, 1980; Kemper et al., 1980) и ИКФС-2 (Головин и др., 2017).

Методика взаимной калибровки измерений приборов ИКФС-2 и SI-1

Прямой метод взаимной калибровки двух различных спутниковых приборов осуществляется с помощью сопоставления их измерений, максимально согласованных по времени и пространству. Однако ввиду очевидной невозможности проведения прямых (синхронных) сопоставлений SI-1 и ИКФС-2 требуется применение того или иного метода косвенных (непрямых) сравнений. Стандартным способом проведения таких сопоставлений является метод двойных разностей (Elliott et al., 2009). При этом в настоящей работе в качестве опорных измерений принимались результаты расчётов спектров уходящего излучения ИКФС-2 и SI-1 на основе данных аэрологического радиозондирования с использованием известного радиационного кода высокого качества LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model, построчная модель передачи излучения) (Alvarado et al., 2013).

Таким образом, в основе применённой в настоящей работе методики двойных разностей по интеркалибровке двух приборов лежит соотношение:

$$\Delta L(\nu) = [L_{SI}(\nu) - L_{SI_calc}(\nu)] - [L_{IKFS}(\nu) - L_{IKFS_calc}(\nu)]. \quad (1)$$

Здесь L_{SI} и L_{IKFS} — спектры атмосферы, измеренные приборами SI-1 и ИКФС-2 (в единицах спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ, мВт/(ср·м²·см⁻¹)), а L_{SI_calc} и L_{IKFS_calc} — опорные спектры, вычисленные полинейным методом (line-by-line) на основе соответствующих данных радиозондовых измерений, подобранных для пар спектров двух приборов.

Все спектральные данные, фигурирующие в выражении (1), приводятся к одной и той же сетке спектральных отчётов, совпадающей со шкалой отсчётов выходных спектров SI-1. При этом спектры ИКФС-2 пересчитываются на сетку спектральных отсчётов SI-1 с использованием методики пересчёта, представленной в работе (Козлов и др., 2018), учитывающей различие аппаратных функций приборов и применяемой функции аподизации выходных данных.

Подбор исходных данных для проведения анализа состояния взаимной калибровки приборов SI-1 и ИКФС-2 методом двойных разностей осуществлялся в три этапа:

1. Были отобраны спектры SI-1 (1977, 1979), соответствующие безоблачным условиям наблюдения (всего 1015 безоблачных измерений).
2. Для каждого из отобранных в п. 1 спектров SI-1 были подобраны спектры ИКФС-2 (как правило, не менее 2–3 спектров ИКФС-2 для каждого спектра SI-1) за 2015–2017 гг. наблюдений. При этом брались только безоблачные околонадирные (зенитный угол наблюдения не более 2°) измерения ИКФС-2, согласованные с измерением SI-1 по месту (рассогласование не более 100 км) и времени (рассогласование не более 24 ч без учёта разницы в годах).
3. Для отобранных спектров SI-1 и ИКФС-2 были также найдены согласованные по времени (не более 24 ч) и месту (не более 100 км) радиозондовые измерения, при этом использовались данные с сайта университета Вайоминга (<http://weather.uwyo.edu/upper-air/sounding.html>). Отметим, что большая часть отобранных экспериментальных спектров относилась к северному полушарию и европейскому региону.

Подобранные файлы данных радиозондирования содержали измерения профилей температуры и влажности на фиксированной сетке высот (давлений). Температура поверхности определялась по яркостной температуре в окне прозрачности атмосферы, при этом для измерений ИКФС-2 температура подстилающей поверхности уточнялась по данным продукта GFS (Global Forecast System, Глобальная система прогнозирования), разработанного NCEP (National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов).

При расчёте спектров SI-1 и ИКФС-2 использовались соответствующие данные о содержании углекислого газа в атмосфере. Спектры SI-1 рассчитывались для концентрации CO₂, равной 335 ppm (1977–1979). Спектры для измерений ИКФС-2 рассчитывались для среднегодовых значений концентрации CO₂ по данным фоновой станции Мауна-Лоа (США) (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/>): 2015 г. — 394,6 ppm; 2016 г. — 396,2 ppm; 2017 г. — 397,8 ppm. Внешние данные по вариации озона в настоящей работе при расчётах не использовались.

Результаты расчётов

Пример сопоставления расчётов уходящего излучения с экспериментальными данными приборов SI-1 и ИКФС-2 приведён на *рис. 1* (о. Диксон, Россия, 82,12° в.д. и 72,88° с.ш.) (см. с. 75) и демонстрирует в целом очень хорошее согласие.

На *рис. 2* (см. с. 75) представлены графики среднего и стандартного (среднеквадратического) отклонений для двойных разностей, вычисленных по всем подобранным совмещённым измерениям и выраженных в единицах СПЭЯ. Для средних полученные значения не превышают 1–2 мВт/(м²·ср·см⁻¹) во всём спектральном диапазоне, в окнах прозрачности

атмосферы — $1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$. Однако соответствующие отклонения составили до $6 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$ в центре полосы CO_2 15 мкм , до $3 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$ — в полосе озона и $3\text{--}5 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$ — в полосе $1300\text{--}1350 \text{ см}^{-1}$.

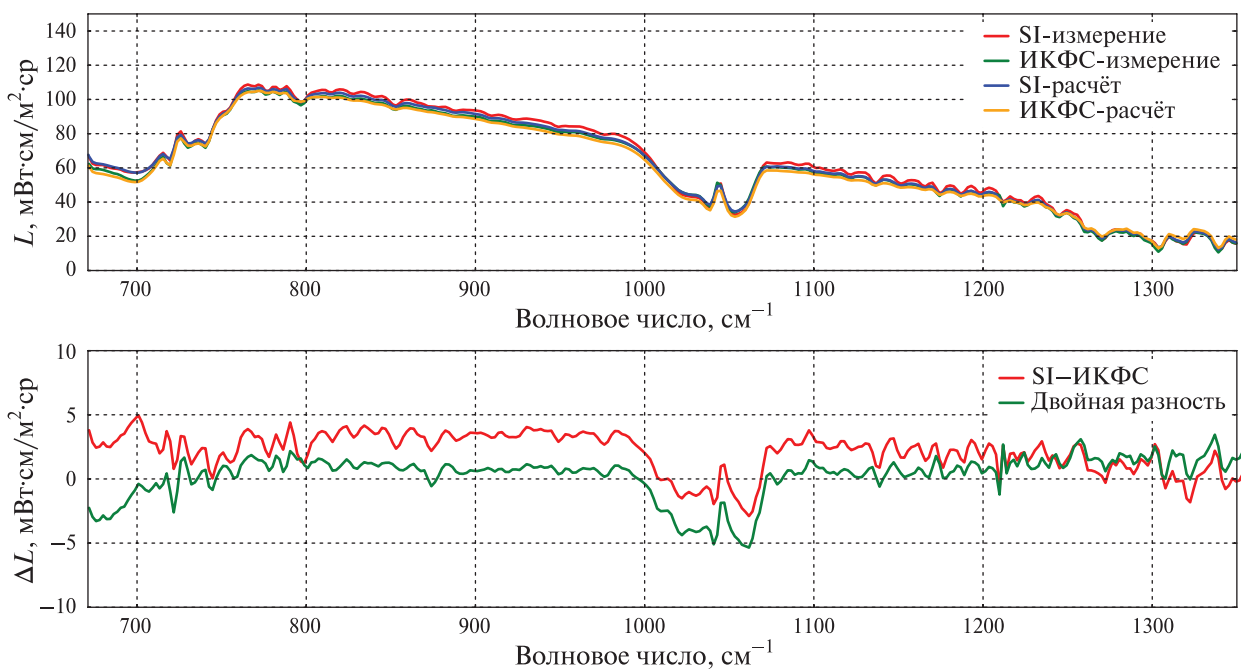


Рис. 1. Графики измеренных и расчётных СПЭЯ уходящего ИК-излучения (вверху) и разностей и двойных разностей (внизу)

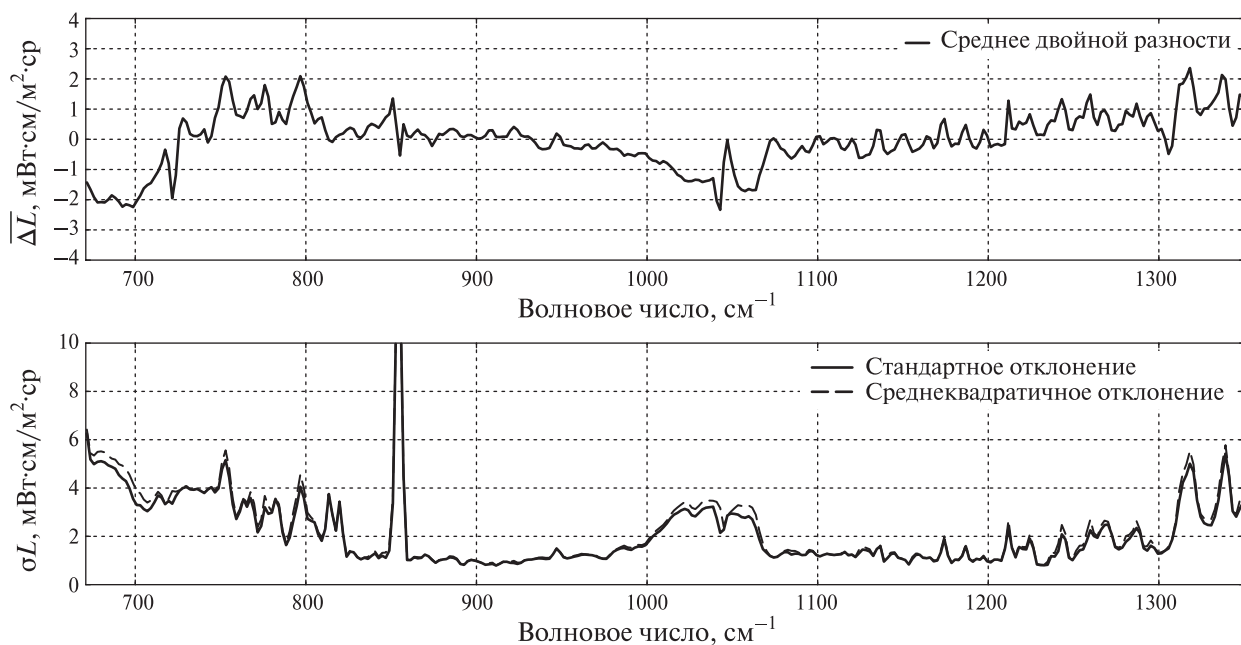


Рис. 2. Графики среднего (вверху) и стандартного/среднеквадратического (внизу) отклонения для двойных разностей SI-1 и ИКФС-2, вычисленных согласно соотношению (1) по всем совмещённым измерениям и выраженных в единицах СПЭЯ

Для уменьшения уровней изменчивости двойных разностей и тем самым повышения достоверности оценки их среднего были применены дополнительные критерии отбраковки сомнительных случаев сравнений на основе анализа качества радиозондовых измерений,

степени согласования измерений во времени и пространстве, а также самих величин двойных разностей. В результате такой дополнительной фильтрации среднее для двойных разностей практически не изменилось, однако соответствующие стандартные отклонения значительно уменьшились и составили $1\text{--}2\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$ почти во всём спектральном диапазоне (рис. 3).

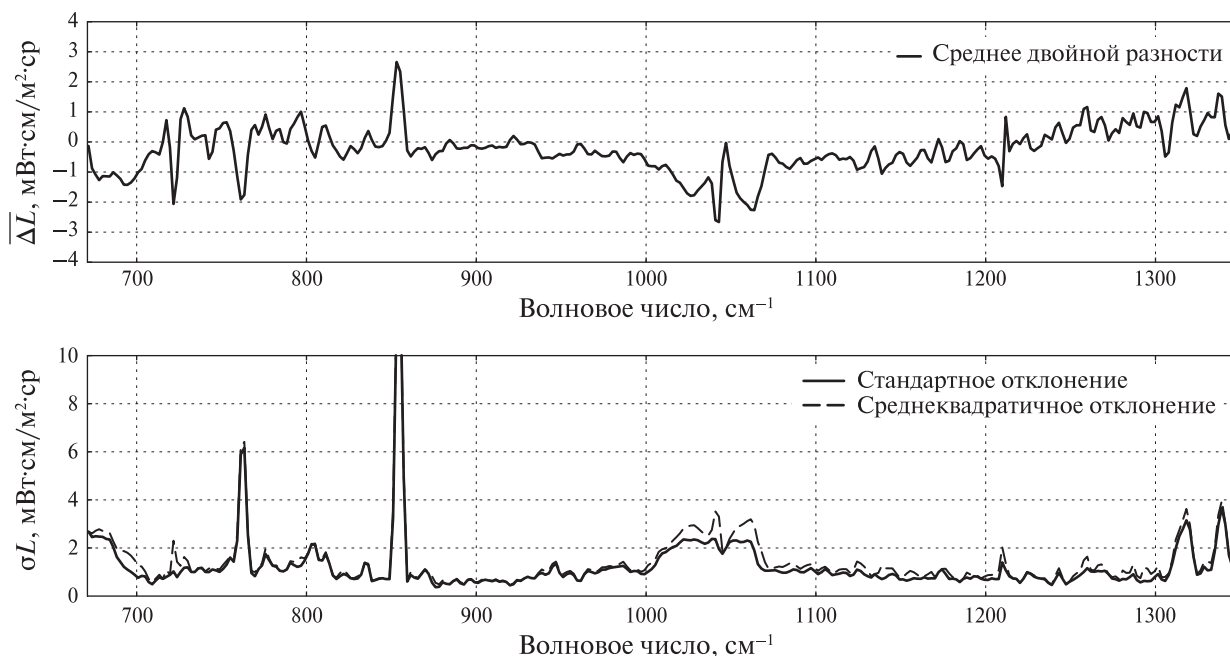


Рис. 3. Графики среднего (вверху) и стандартного/среднеквадратического (внизу) отклонения для двойных разностей SI-1 и ИКФС-2, полученные с использованием выражения (1) по выборке из наиболее достоверных измерений

На приведённых выше графиках следует отметить наличие «всплесков» вблизи 750 и 855 см^{-1} , вызванных имеющимися для аппаратуры SI-1 артефактами в отдельных спектральных каналах.

Анализ полученных результатов

Представленное на рис. 3 среднее для двойных разностей SI-1 и ИКФС-2 позволяет оценить состояние взаимной калибровки двух приборов, а соответствующие отклонения для двойных разностей — достоверность полученной оценки. Данные результаты полезно сравнить с ранее полученными результатами взаимной калибровки аппаратуры ИКФС-2 и европейского прибора IASI, признанного GSICS (Global Space-based Inter-Calibration System, Международная глобальная система интеркалибровки спутниковых данных) в качестве референсного и рекомендованного к использованию при проведении интеркалибровочных сопоставлений. Как показано в работе (Zavelevich et al., 2018), в ходе проведённых с 2015 по 2017 г. сопоставлений с IASI на спутниках MetOp-A и MetOp-B аппаратура ИКФС-2 продемонстрировала высокое качество и стабильность калибровки с погрешностью порядка $0,1\text{--}0,2\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$ в спектральном диапазоне $660\text{--}1350\text{ см}^{-1}$. При этом сопоставления ИКФС-2 с IASI проводились как прямым методом, так и методом двойных разностей с использованием измерений радиометра SEVIRI/MSG-2 в качестве опорных (сравнения проводились в каналах SEVIRI 7,3; 8,7; 9,7; 10,8; 12,0 и 13,4 мкм) (Козлов и др., 2016).

Также полезно сравнить полученную систематическую взаимную погрешность измерений двух приборов с уровнем их радиометрического шума (Головин и др., 2017; Kempe et al., 1980). Пороговая спектральная яркость SI-1 в диапазоне $(660\text{--}1300)\text{ см}^{-1}$ составляет порядка

0,5–0,7 мВт/(м²·ср·см⁻¹) и существенно превышает пороговую СПЭЯ для прибора ИКФС-2, равную около 0,15–0,2 мВт/(м²·ср·см⁻¹) для неаподизированных спектров. Таким образом, суммарный (в среднеквадратическом смысле) уровень радиометрического шума двух приборов сопоставим с полученными значениями для среднего и стандартного отклонения двойных разностей.

Наконец, на *рис. 4* приведены средние разности спектров уходящего теплового излучения, измеренных фурье-спектрометрами ИКФС-2 и SI-1, до и после согласования взаимной калибровки приборов. При этом данные без коррекции абсолютной калибровки прибора SI-1 заимствованы из работы (Тимофеев и др., 2018), а данные после коррекции получены путём добавления спектрально-зависимой величины взаимного смещения калибровки двух приборов, представленной на верхнем графике *рис. 3*.

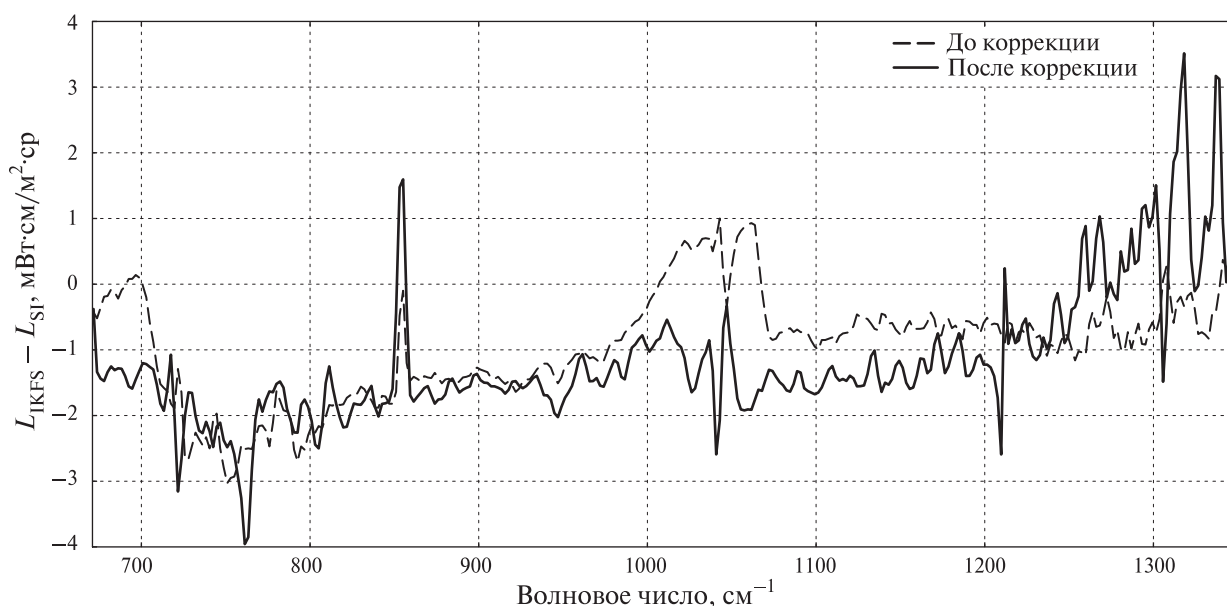


Рис. 4. Средние разности спектров уходящего теплового излучения, измеренных фурье-спектрометрами ИКФС-2 и SI-1, до и после согласования взаимной калибровки приборов

Из *рис. 4* видно, что систематические отличия средних спектров уходящего теплового излучения, измеренных SI-1 и ИКФС-2 в 1977–1979 и 2016–2017 гг., сохранились и после радиометрической коррекции. Эти отличия заметно увеличились в центральной части полосы поглощения CO₂ вблизи 15 мкм, а также в окне прозрачности 1075–1200 см⁻¹. Если увеличение отличий в окне прозрачности обусловлено изменением температуры поверхности планеты за 40 лет, то отличия в полосе CO₂ 15 мкм связаны со значительным ростом содержания углекислого газа в атмосфере планеты (с 335 до 396,2–397,8 ppm).

В целом из *рис. 4* следует, что разности после коррекции (согласования) взаимной калибровки SI-1 и ИКФС-2 в среднем увеличились и спектры уходящего излучения, измеренные ИКФС-2, меньше по абсолютной величине спектров излучения, измеренных SI-1.

С методической точки зрения следует отметить, что в настоящей работе при использовании метода двойных разностей подбирались четвёрки измерений «спектр SI – радиозонд для SI – спектр ИКФС – радиозонд для ИКФС». Для каждой такой четвёрки требовалось выполнение достаточно жёстких условий согласования по времени и пространству, в результате из почти 1000 безоблачных измерений SI-1 с подобранными для них радиозондами при получении результатов на *рис. 3* использовалась выборка только из порядка 30 наиболее достоверных измерений. Альтернативным способом здесь является использование независимых выборок «измерение минус расчёт» для каждого из приборов в отдельности, при этом нет необходимости согласовывать по времени и месту пары ИКФС с парами SI, достаточно просто

использовать тот же регион (преимущественно европейский) и тот же сезон. В данном способе, несмотря на снижение степени идентичности выборок для двух приборов, существенной в методе двойных разностей, значительно возрастает объём выборок, важный с точки зрения достоверности получаемых оценок. Мы планируем в дальнейшем рассмотреть и такой альтернативный вариант построения выборок.

Заключение

Применение метода двойных разностей на основе выражения (1) позволило подтвердить хорошее согласование взаимной калибровки фурье-спектрометров SI-1 и ИКФС-2. Показано (см. *рис. 3*), что как среднее, так и стандартное отклонение для двойных разностей SI-1 и ИКФС-2 после выборки наиболее достоверных измерений не превышают $1\text{--}2 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$ почти во всём рассматриваемом спектральном диапазоне $660\text{--}1350 \text{ см}^{-1}$.

Анализируя полученные результаты, а также ранее опубликованные результаты интеркалибровки аппаратуры ИКФС-2 и референсных приборов IASI на спутниках серии MetOp, демонстрирующие очень хорошее согласие и стабильность, можно сделать вывод о надлежащем качестве абсолютной калибровки фурье-спектрометра SI-1, за исключением отдельных артефактов вблизи $853\text{--}855$ и $751\text{--}753 \text{ см}^{-1}$.

Проведённая взаимокалибровка измерений приборов SI-1 и ИКФС-2, заключающаяся в определении спектрально-зависимой величины взаимного смещения калибровки двух приборов, позволила уточнить полученные ранее оценки изменения за 40 лет средних спектров уходящего теплового излучения по данным SI-1 (1977, 1979) и ИКФС-2 (2015–2017), что показано на *рис. 4*.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00768).

Литература

1. Головин Ю. М., Завелевич Ф. С., Козлов Д. А., Козлов И. А., Монахов Д. О., Никулин А. Г., Успенский А. Б., Рублев А. Н., Кухарский А. В. Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: результаты эксплуатации на борту метеоспутника «Метеор-М» № 2 // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 88–100.
2. Козлов Д. А., Козлов А. А., Завелевич Ф. С., Киселева Ю. В., Козлов И. А., Кухарский А. В., Рублев А. Н., Успенский А. Б., Черкашин И. С. Оценки погрешности бортовой радиометрической калибровки ИК-зондировщика ИКФС-2 по данным сканера SEVIRI // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 264–272.
3. Козлов Д. А., Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Козлов И. А., Дёлер В., Ортель Д., Шпенкух Д. Методика пересчёта спектров теплового излучения атмосферы различного спектрального разрешения для взаимного сопоставления измерений бортовых инфракрасных фурье-спектрометров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 52–60.
4. Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Козлов Д. А., Делер В., Ортель Д., Шпенкух Д. Сопоставление спектров уходящего теплового ИК-излучения разных лет // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 5. С. 65–72.
5. Alvarado M. J., Payne V. H., Mlawer E. J., Uymin G., Shephard M. W., Cady-Pereira K. E., Delamere J. S., Moncet J.-L. Performance of the Line-By-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals: recent updates evaluated with IASI case studies // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. P. 6687–6711.
6. Anderson J. G., Dykema J. A., Goody R. M., Hu H., Kirk-Davidoff D. B. Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. V. 85. P. 367–383.
7. Bantges R. J., Brindley H. E. On the Detection of Robust Multidecadal Changes in Earth's Outgoing Longwave Radiation Spectrum // J. Climate. 2016. V. 29. P. 4939–4947.
8. Elliott D. A., Aumann H. H., Strow L., Hannon S. Two-year comparison of radiances from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) // Proc. SPIE — Intern. Society for Optical Engineering. 2009. V. 7456. DOI: 10.1117/12.826996.

9. Goody R., Anderson J., North G. Testing climate models: an approach // Bull. American Meteorological Society. 1998. V. 79. P. 2541–2549.
10. Griggs J. A., Harries J. E. Comparison of spectrally resolved outgoing longwave radiation over the Tropical Pacific between 1970 and 2003 using IRIS, IMG, and AIRS // J. Climate. 2007. V. 20. P. 3982–4001.
11. Harries J. E., Brindley H. E., Sahoo P. J., Bantges R. J. Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997 // Nature. 2001. V. 410. P. 355–357.
12. Kempe V. Satellite-Fourier-spectrometer for Meteor-25: design problems and mission // Acta Astronautica. 1980. V. 7. P. 893–902.
13. Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H. Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // Acta Astronautica. 1980. V. 7. P. 1403–1416.
14. Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A. IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands // GSICS Quarterly. 2018. V. 12. No. 1. P. 4–6.

Intercalibration of SI-1 and IKFS-2 spaceborne infrared Fourier transform spectrometers

D. A. Kozlov¹, F. S. Zavelevich¹, Yu. M. Timofeev²,
A. V. Polyakov², I. A. Kozlov¹, I. S. Cherkashin¹

¹ SSC Keldysh Research Centre, Moscow 125438, Russia
E-mail: dima_kozlov@mail.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

The study of climate change based on spectral radiances of outgoing infrared radiation measured by different space-borne spectroradiometers, requires careful intercalibration of these instruments. The results of SI-1/Meteor-28(-29) (1977, 1979) and IKFS-2/Meteor-M N2 (in orbit operation since 2015) FTIR spectrometers intercalibration are presented in this paper to clarify the results of IR atmospheric spectra changes over the past 40 years, previously obtained by authors. The double-difference method is applied due to the impossibility of direct (synchronous) comparisons. Calculations of the infrared atmospheric spectra based on the radiosonde data and carbon dioxide data carried out using the LBLTRM radiation code are used as reference measurements. It was found that both the mean and standard deviation for double differences after selecting the most reliable measurements do not exceed 1–2 mW/(m²·sr·cm⁻¹) in almost the entire spectral range under consideration 660–1350 cm⁻¹, which indicates a good calibration agreement between two instruments.

Keywords: infrared Fourier Transform spectrometer, space-borne instruments, atmospheric spectra, intercalibration, double-difference method, IKFS-2, SI-1

Accepted: 19.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-72-80

References

1. Golovin Yu. M., Zavelevich F. S., Kozlov D. A., Kozlov I. A., Monakhov D. O., Nikulin A. G., Uspenskii A. B., Rublev A. N., Kukharskii A. V., Infrakrasnyi fur'e-spektrometr IKFS-2: rezul'taty ekspluatatsii na bortu meteosputnika "Meteor-M" No. 2 (Infrared Fourier-Transform Spectrometer IKFS-2 Operating Onboard "Meteor-M" No. 2 Satellite), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 88–100.
2. Kozlov D. A., Kozlov A. A., Zavelevich F. S., Kiseleva Yu. V., Kozlov I. A., Kukharskii A. V., Rublev A. N., Uspenskii A. B., Cherkashin I. S., Otsenki pogreshnosti bortovoi radiometricheskoi kalibrovki IK-zondirovshchika IKFS 2 po dannym skanera SEVIRI (IRFS-2 onboard radiometric calibration errors evaluation by comparison with SEVIRI/Meteosat-10 data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 264–272.

3. Kozlov D. A., Timofeev Yu. M., Polyakov A. V., Kozlov I. A., Deler V., Ortel D., Shpenkukh D., Metodika perescheta spektrov teplovogo izlucheniya atmosfery razlichnogo spektral'nogo razresheniya dlya vzaimnogo sopostavleniya izmerenii bortovykh infrakrasnykh fur'e-spektrometrov (Recalculation of outgoing atmospheric spectra measured by infrared Fourier transform spectrometers with different spectral resolution), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 52–60.
4. Timofeev Yu. M., Polyakov A. V., Kozlov D. A., Deler V., Ortel D., Shpenkukh D., Sopostavlenie spektrov ukhodyashchego teplovogo IK izlucheniya raznykh let (Comparison of outgoing IR radiation spectra measured in different years), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 5, pp. 65–72.
5. Alvarado M. J., Payne V. H., Mlawer E. J., Uymin G., Shephard M. W., Cady-Pereira K. E., Delamere J. S., Moncet J.-L., Performance of the Line-By-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals: recent updates evaluated with IASI case studies, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, pp. 6687–6711.
6. Anderson J. G., Dykema J. A., Goody R. M., Hu H., Kirk-Davidoff D. B., Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, Vol. 85, pp. 367–383.
7. Bantges R. J., Brindley H. E., On the Detection of Robust Multidecadal Changes in Earth's Outgoing Longwave Radiation Spectrum, *J. Climate*, 2016, Vol. 29, pp. 4939–4947.
8. Elliott D. A., Aumann H. H., Strow L., Hannon S., Two-year comparison of radiances from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), *Proc. SPIE — Intern. Society for Optical Engineering*, 2009, Vol. 7456, DOI: 10.1117/12.826996.
9. Goody R., Anderson J., North G., Testing climate models: an approach, *Bull. American Meteorological Society*, 1998, Vol. 79, No. 11, pp. 2541–2549.
10. Griggs J. A., Harries J. E., Comparison of spectrally resolved outgoing longwave radiation over the Tropical Pacific between 1970 and 2003 using IRIS, IMG, and AIRS, *J. Climate*, 2007, Vol. 20, pp. 3982–4001.
11. Harries J. E., Brindley H. E., Sagoo P. J., Bantges R. J., Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997, *Nature*, 2001, Vol. 410, pp. 355–357.
12. Kempe V., Satellite-Fourier-spectrometer for Meteor25: design problems and mission, *Acta Astronautica*, 1980, Vol. 7, pp. 893–902.
13. Kempe V., Ortel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H., Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28, *Acta Astronautica*, 1980, Vol. 7, pp. 1403–1416.
14. Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A., IKFS-2 radiometric calibration stability in different spectral bands, *GSICS Quarterly*, 2018, Vol. 12, No. 1, pp. 4–6.