

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**СОПОСТАВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ УХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО
ИК ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНЫХ ЛЕТ**

© 2018 Ю.М. Тимофеев¹, А.В. Поляков^{1,*}, Д.А. Козлов², Ф.С. Завелевич²,
Ю.М. Головин², В. Делер³, Д. Эртель⁴, Д. Шпенкух^{3,5}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

² Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, Москва, Россия

³ Ранее работал в Метеорологической службе ГДР

⁴ Ранее работал в Институте космических исследований АН ГДР

⁵ Научное общество Лейбница, Берлин

E-mail: *a.v.polyakov@spbu.ru

Поступила в редакцию 22.01.2018 г.

Проведены сопоставления спектров уходящего теплового ИК-излучения, измеренных фурье-спектрометром SI-1 в 1977 и 1979 гг. со спутников Метеор-28 и -29, с данными расчетов на основе современного радиационного кода LBLRTM и данных радиозондирования атмосферы. Средние разности между измерениями и расчетами в большинстве случаев не превышают 2 мВт/(м²×ср×см⁻¹) в спектральной области 660–1600 см⁻¹. Среднеквадратические разности в среднем составляют 2–4 мВт/(м²×ср×см⁻¹). Эти значения примерно на 1 мВт/(м²×ср×см⁻¹) больше соответствующих разностей между расчетами и измерениями для современного фурье-спектрометра ИКФС-2 (спутник «Метеор-М» № 2). Сравнения экспериментальных спектров 1977 и 1979 гг. и 2015–2016 гг. показали, что измеренная прибором ИКФС-2 интенсивность уходящего излучения в среднем меньше на 0.5–3.0 мВт/(м²×ср×см⁻¹) интенсивности излучения по данным измерений примерно 40-летней давности прибором SI-1, функционировавшим на спутниках Метеор-28 и -29. Этот эффект может быть связан с увеличением содержания в атмосфере углекислого газа и вызванным этим подъемом излучающих слоев атмосферы в области тропосферы с меньшей температурой.

Ключевые слова: уходящее тепловое излучение, фурье-спектрометры SI-1 и ИКФС-2, изменения климата

DOI: 10.31857/S020596140003243-8

ВВЕДЕНИЕ

Первые надирные измерения спектров уходящего теплового ИК-излучения относительно высокого разрешения (2.5 и 1.4 см⁻¹) были осуществлены на спутниках Нимбус-3 и -4 в 1969 и 1970 гг. с помощью аппаратуры IRIS-C и -D (Hanel, Conrath, 1969; Wark, Hilleary, 1969). Примерно через десять лет были проведены спутниковые эксперименты с подобной аппаратурой SI-1, разработанной Академией наук ГДР (Kempe, 1980). В дальнейшем в космосе функционировали ИК-приборы высокого спектрального разрешения, созданные в разных странах, а именно приборы IMG, AIRS, IASI, CrIS и ИКФС-2 (Ogawa et al., 1994; Aumann, Miller, 1995; Phulpin et al., 2007; Glumb et al., 2003; Головин и др., 2013). Приведем рис. 1, иллюстрирующий приборы, использованные за период 1969–2016 гг., построенный на основе рисунка из работы (Theodore et al., 2015) и данных ресурса WMO OSCAR (<https://www.wmo-sat.info/oscar>),

содержащего сводную информацию обо всех космических аппаратах для исследования атмосферы и поверхности.

В таблице представлены для примера основные характеристики четырех фурье-спектрометров, функционировавших в разные годы.

Как следует из приведенных данных, за прошедшие годы существенно улучшилось спектральное разрешение и возросло число каналов измерений надирных приборов в ИК-области спектра. Основное назначение упомянутых приборов – температурно-влажностное зондирование, определение

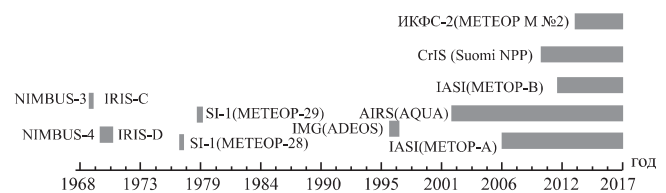


Рис. 1. Приборы для измерений уходящего теплового ИК-излучения на различных ИСЗ за период 1969–2014 гг.

Таблица. Характеристики фурье-спектрометров IASI, CrIS, ИКФС-2, SI

Прибор	IASI	CrIS	ИКФС-2	SI-1
Спектральный диапазон, см ⁻¹	LW: 645–1210 MW: 1210–2000 SW: 2000–2760	LW: 650–1095 MW: 1210–1750 SW: 2155–2550	LW: 660–1209.5 MW: 1210.2–2000.5	400.47– 1606.05
Число спектральных отсчетов	8461	1305	2701	579
Шаг спектральной сетки, см ⁻¹	0.25	LW: 0.625 MW: 1.25 SW: 2.5	LW: 0.35 MW: 0.70	2.0857813
MPX* (MPD), см	2.0	2.0	1.67	0.2
Функция аподизации	Гаусса	(1) Хэмминга (2) Блэкмана-Харриса	Гаусса	Хаппа-Гензеля
Ширина аппаратной функции (FWHM), см ⁻¹	0.5	(1) 1.82/(2·MPD) (2) 2.274/(2·MPD)	LW: 0.7 MW: 1.4	5.0

* MPX – максимальная оптическая разность хода (MPD, maximum path difference).

характеристик газового состава атмосферы и параметров поверхности (Кондратьев, Тимофеев, 1978). В последние годы измерения уходящего теплового излучения различных лет стали использоваться для климатологических исследований (Goody, Naskins, 1998; Harries et al., 2001; Anderson et al., 2004). Сравнения спектров уходящего излучения разных лет позволяют получить информацию как об изменении компонент радиационного баланса планеты, так и об изменении физических и химических параметров атмосферы. В данной работе мы анализируем спектры, зарегистрированные в 1977 и 1979 гг. (аппаратура SI-1) и 2015–2016 гг. (аппаратура ИКФС-2) для сравнений интенсивности уходящего теплового ИК-излучения в разные годы.

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРОВ SI-1 И ИКФС-2

Фурье-спектрометры SI-1, разработанные в Академии наук ГДР (Кемпе, 1980), успешно использовались на спутниках «Метеор» в 1977 и 1979 гг. Данные измерений 1977 г. содержат 1082 спектра (19 дней измерений, 22 орбиты спутника) в период с 5 июля по 23 сентября, измеренных от Северного до Южного полюса как над сушей, так и над океанами. Измерения 1979 г. включают 1675 спектров за 40 дней (56 орбит) с 26 января по 19 июня. Они также охватывают практически все широты.

На первом этапе анализа из всего банка данных спектров SI-1 были удалены примерно 5% спектров, содержавших очевидные измерительные погрешности (отрицательные значения излучения, заметные спектральные аномалии и т.д.).

На следующем этапе были выделены спектры, относящиеся к безоблачной атмосфере. В качестве критериев использовались измерения излучения в окне прозрачности 8–12 мкм и разности яркостных температур в 15-мкм полосе CO₂.

Примеры анализа спектров ИКФС-2 за 2015–2016 гг. и использования их для определения параметров атмосферы приведены в работах (Поляков и др., 2016; Асмус и др., 2016; Гаркуша и др., 2017). О качестве спектров ИКФС-2 можно судить на основе их сопоставлений с данными измерений европейского прибора IASI, прошедшего тщательную калибровку. Как показано в работе (Поляков и др., 2016), разности интенсивностей уходящего излучения, измеренных двумя приборами в области окна прозрачности (800–1000 см⁻¹), близки к нулю (менее 0.1 мВт/(м²×ср×см⁻¹)) и составляют 0.4–0.8 в полосе 15 мкм CO₂. Приведенные данные наглядно демонстрируют высокое качество измерений уходящего излучения российским прибором ИКФС-2.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СПЕКТРОВ ПРИБОРА SI-1

По данным работы (Кемпе et al., 1980), радиометрическая и спектрометрическая калибровки прибора SI-1 позволили осуществлять измерения уходящего теплового ИК-излучения с погрешностями от 0.8 в центре полосы CO₂ до 0.5 мВт/(м²×ср×см⁻¹) в окне прозрачности.

Для независимой проверки качества измерений SI-1 мы провели сопоставление измерений и расчетов с помощью широко известного радиационного кода LBLRTM версии 12.1 (LBLRTM 12.1, 2011; Clough et al., 2005) и радиозондовых измерений.

Программа LBLRTM осуществляет расчеты функций пропускания, спектров интенсивностей теплового излучения и соответствующих яркостных температур излучения в широкой спектральной области от УФ до субмиллиметровых длин волн (Alvarado et al., 2013). Для описания формы спектральных линий может быть использован контур Фойгта. При описании континуального поглощения водяного пара учитываются механизмы как собственного, так и постороннего уширения, а также континуальные поглощения кислорода, азота и углекислого газа. В расчетах используются данные по тонкой структуре HITRAN, включая учет сдвига центров линий, интерференцию спектральных линий CO_2 , температурные зависимости полуширин и самоуширение в линиях водяного пара. Поглощение ряда молекул (например, галогенуглеводородов) учитывается с помощью коэффициентов поглощения, зависящих от температуры. Важнейшими факторами, ограничивающими точность расчетов, являются погрешности параметров тонкой структуры. LBLRTM постоянно валидируется на основе сравнений с измерениями спектров излучения атмосферы прежде всего в ИК-области спектра. Примеры сопоставлений результатов расчетов с помощью версии 12.1 этой программы с измерениями прибора IASI приведены в работе (Alvarado et al., 2013).

Численное моделирование измерений спектров, регистрируемых ИК-зондирующим ИКФС-2, с помощью интегральной формы уравнения переноса собственного теплового излучения системы атмосфера–поверхность (Тимофеев, Васильев 2003), требует задания различных входных данных – характеристик физического и оптического состояния атмосферы и поверхности, а также ряда характеристик спутниковой аппаратуры. Причины рассогласований между измерениями и расчетами могут быть разнообразны. Перечислим основные из них:

1. Погрешности радиометрической (абсолютной) калибровки измерений спектров уходящего теплового ИК-излучения.
2. Погрешности спектрометрической калибровки (спектральной привязки) измерений.
3. Погрешность задания аппаратной функции спектрометра SI-1.
4. Погрешности задания спектроскопической информации о тонкой структуре полос молекулярного поглощения атмосферных газов (интенсивностей, полуширин линий и т.д., формы контуров линий), континуальных коэффициентов поглощения.
5. Пространственная и временная рассогласованность радиозондовых и спутниковых

измерений, в том числе различие их пространственного разрешения.

6. Наличие неконтролируемой облачности в поле зрения спутникового прибора.
7. Неучет аэрозольной компоненты и рассеяния в атмосфере.
8. Погрешность задания излучательной способности поверхности.
9. Погрешности задания параметров физического и химического состояния атмосферы (погрешности радиозондирования, экстраполяции радиозондовых данных, задания содержания поглощающих газов, вертикальной дискретизации данных и т.д.).
10. Вычислительные погрешности радиационного кода LBLRTM.

Основная задаваемая при расчетах информация о профилях давления, температуры и влажности атмосферы получена с помощью радиозондирования. При подборе данных радиозондирования использовались следующие критерии: точка запуска зонда удалена от центра пиксела спутниковых измерений излучения не далее 200 км, разница времени двух типов измерений не более 3 ч.

Расчеты уходящего теплового излучения с помощью радиационного кода LBLRTM выполнены для наблюдений прибора SI-1 строго в надири. Для всех газов, кроме озона и водяного пара, используются профили, постоянные по высоте. Для озона использовался средний за период 1980–2020 гг. профиль озона (модель WACCM). Значения отношений смеси газов (в ppmv): CO_2 – 335 (~ измерения на станции Mauna-Loa, 1977), N_2O – 0.290, CO – 0.100, CH_4 – 1.501. Излучательная способность поверхности (ИСП) предполагалась равной 1.0 по всему спектру. Тщательный анализ качества исходной информации при расчетах, а также самих измеренных спектров уходящего излучения на предварительной фазе сравнений позволил нам обнаружить ряд очевидных ошибок в исходной информации и спектрах, например остаточное влияние облаков и т.д. В результате были отобраны 137 пар спектров SI-1 и данных радиозондирования. На рис. 2 показано расположение станций радиозондирования, использованных для сравнений. Как видно из него, здесь преобладают станции, расположенные в умеренных широтах Северного полушария, но имеются и станции в тропической, арктической и антарктической областях. Такое распределение обусловлено как географией сети радиозондирования, так и выбором мест измерения спектров SI-1.

На рис. 3 приведены средние, стандартные отклонения и среднеквадратические разности интенсивности излучения рассчитанных и измеренных спектров SI-1 в спектральной области



Рис. 2. Положение станций радиозондирования, данные которых были использованы при сравнениях рассчитанных и измеренных спектров.

670–1600 см^{-1} . Средние разности (СР), как правило, не превышают 2 $\text{мВт}/(\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{см}^{-1})$. В большей части рассматриваемой спектральной области они положительны, т.е. расчет дает большие значения уходящего излучения, чем измерения. Обратная картина наблюдается в области полосы поглощения озона, но так как мы не использовали локализованные по времени и месту профили содержания озона, интерпретация этой области затруднительна. Стандартные отклонения разности (СОР) и среднеквадратическая разность (СКР) в среднем составляют 2–4 $\text{мВт}/(\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{см}^{-1})$. Существенный рост рассогласований в области 850–857 см^{-1} обусловлен известным аппаратным дефектом измерений аппаратуры SI-1 (Kempе et al., 1980). Минимальные значения СОР и СКР наблюдаются в области полосы поглощения CO_2 при 15 $\mu\text{м}$, что связано именно с использованием радиозондовых измерений температуры и влажности, адекватных измерениям уходящего излучения.

При сравнении расчетных и экспериментальных спектров в терминах яркостной температуры (рис. 4) средние разности, как правило, составляют от 1 до 2 К и в большинстве случаев положительны, а стандартное отклонение и среднеквадратичные разности яркостных температур колеблются в пределах 2–4 К, за исключением центра полосы CO_2 и полосы озона, где они больше, и расчеты осуществляются либо на основе экстраполяции радиозондовых измерений температуры до высот 50–60 км, либо при использовании среднего профиля озона, т.е. данных, неадекватных спектротрическим измерениям.

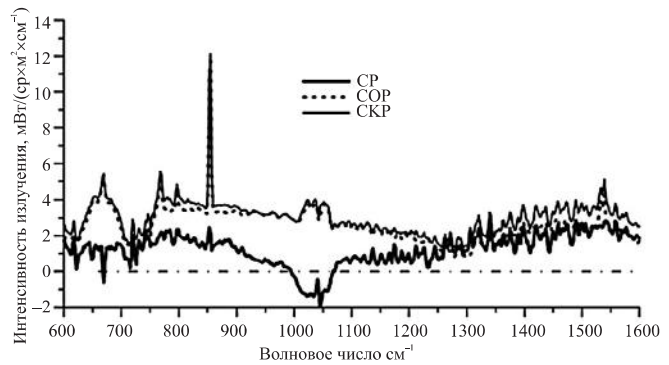


Рис. 3. Средняя разность (СР), стандартное отклонение разности (СОР) и среднеквадратичная разность (СКР) интенсивности излучения рассчитанных и измеренных спектров SI-1.

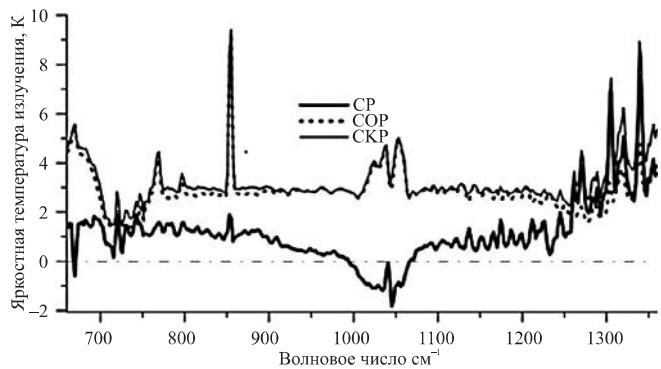


Рис. 4. Среднее, стандартное отклонение и среднеквадратичная величина разности яркостной температуры излучения рассчитанных и измеренных спектров SI-1. Спектральная область 660–1360 см^{-1} .

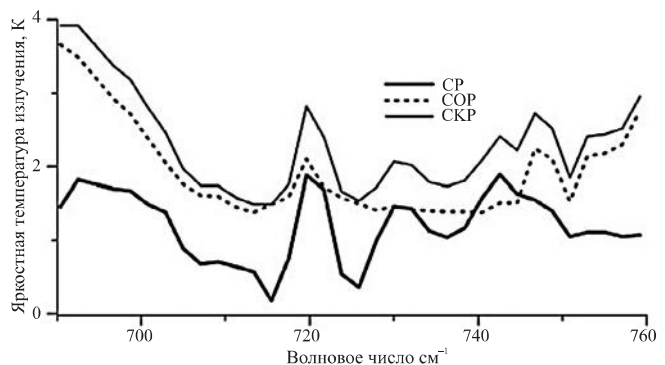


Рис. 5. Среднее, стандартное отклонение и среднеквадратичное разности яркостной температуры излучения рассчитанных и измеренных спектров SI-1. Спектральная область 690–760 см^{-1} .

В спектральной области полосы поглощения CO_2 (рис. 5) средние разности составляют 0.5–2 К, СОР и СКР 2–4 К, причем в средней части полосы (700–740 см^{-1}), где температура уходящего излучения определяется в основном только температурой атмосферы, они близки к 2 К.

Во всех рассмотренных случаях в большей части спектра наблюдается систематическое превышение результатов расчета над экспериментальными данными. Тем не менее делать вывод о систематической погрешности радиометрической калибровки прибора SI-1 преждевременно, т.к. это превышение максимально в окне прозрачности, что может быть вызвано ошибкой задания излучательной способности и температуры поверхности. Вместе с тем разность в крыле полосы 15 мкм также положительна и в среднем близка к 1 К, что как раз может оказаться связанным с систематической ошибкой в радиометрической калибровке интерферометра.

Подобные сравнения расчетов и измерений прибора ИКФС-2 были проанализированы в работе (Поляков и др., 2016). В ней показано, что при аналогичных сравнениях средние разности СОР и СКР меньше примерно на $1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{см}^{-1})$, или на 1 К в терминах яркостной температуры излучения, чем в случае сравнений с прибором SI-1. При этом и в сравнениях с ИКФС-2 расчетные значения оказываются больше, чем экспериментальные. Это позволяет предположить, что существуют систематические рассогласования абсолютных калибровок приборов SI-1 и ИКФС-2. Причины выявленных отличий, как мы указывали выше, многообразны, и требуются дальнейшие исследования для определения основных факторов и, возможно, дополнительной кросс-калибровки приборов SI-1 и ИКФС-2.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ УХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЛЕТ

Сопоставим экспериментальные спектры уходящего излучения, зарегистрированные ИКФС-2 в 2015–2016 гг. и SI-1 в 1977 и 1979 гг. При этом, как и выше, ограничимся измерениями в безоблачной атмосфере. При подборе ансамбля сопоставимых результатов измерений уходящего излучения разных лет были приняты следующие условия совмещения:

- рассогласование измерений SI-1 и ИКФС-2 по дате: \pm не более 1 сут;
- рассогласование по координатам: не более 100 км;
- максимальный зенитный угол измерений ИКФС-2: не более 10 град.

При указанных выше условиях поиска пары были подобраны для 772 из 1015 спектров SI-1 1977 г. Общее число найденных спектров ИКФС – 9018, т.е. в среднем приходилось примерно по 10 спектров ИКФС на 1 спектр SI. Наличие облачности при измерениях ИКФС-2 определялось по данным уровня 3 прибора OMI (датасет

Cloudiness_OMI). Общее число пар согласованных измерений SI-1 и ИКФС-2 для безоблачной атмосферы составило 179.

При проведении сравнений измеренных спектров SI-1 и ИКФС-2 были согласованы их спектральные характеристики, в частности спектральное разрешение. Спектры уходящего теплового излучения прибором ИКФС-2, подобранные для сравнений со спектрами SI-1, были приведены к спектральному разрешению SI-1 с использованием методики работы (Козлов и др., 2018 (в печати)), что позволило согласовать как положение спектральных отсчетов, так и форму и ширину спектральной аппаратной функции.

На рис. 6 приведено сравнение средних спектров по данным измерений ИКФС-2 и SI-1 для безоблачных условий. В нижней части рисунка представлена разность этих средних. Разность в большей части рассматриваемой спектральной области $680\text{--}1350 \text{ см}^{-1}$ отрицательна, т.е. уходящее излучение, измеренное ИКФС-2, меньше соответствующего излучения SI-1, что может быть связано с увеличением содержания углекислого газа в атмосферы за почти 40 лет и смещением максимально излучающих слоев атмосферы в более высокие слои тропосферы с более низкой температурой. Интересно отметить положительный знак разности в центре полосы поглощения CO_2 , что означает рост уходящего излучения за счет увеличения высоты излучения

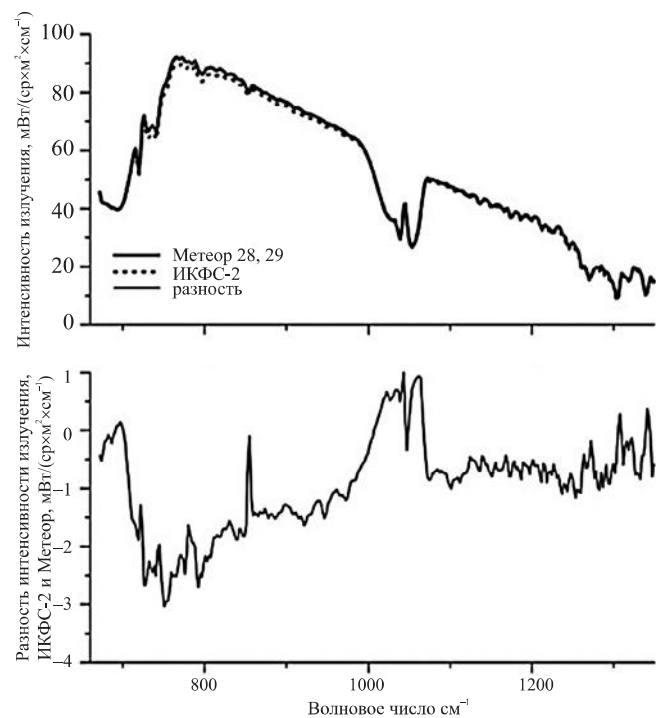


Рис. 6. Средние спектры ИКФС-2 и SI-1 и их разность. Безоблачные ситуации.

в стратосфере, где знак градиента температуры противоположен по сравнению с тропосферой.

Необходимо отметить, что наблюдаемые в уходящем ИК-тепловом излучении разных лет разности могут быть обусловлены и временными вариациями температуры атмосферы и поверхности (суточными, межгодовыми, трендами), присутствующими в анализируемом ансамбле. Суточные вариации при анализе средних значений в ансамбле спектров из 179 реализаций носят в основном случайный характер и для средних значений должны быть близки к нулю. Анализ возможных вкладов от межгодовых трендов в полученные отличия будет продолжен в дальнейших исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены сопоставления измерений спектров уходящего теплового ИК-излучения фурье-спектрометром SI-1 в 1977 и 1979 гг. на спутниках Метеор-28 и -29 с данными расчетов на основе радиационного кода LBLRTM и данных радиозондирования атмосферы. Кроме того, сопоставлены измерения спектров уходящего теплового излучения приборов SI-1 с данными измерений ИКФС-2 в 2015–2016 гг.

1. Сравнения измеренных спектров уходящего теплового ИК-излучения в 1977 и 1979 гг. аппаратурой SI-1 с расчетами на основе интегральной формы уравнения переноса излучения показали, что средние разности между результатами измерений и расчетов в большинстве случаев не превышают $2 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{см}^{-1})$ в спектральной области $660\text{--}1600 \text{ м}^{-1}$. В большей части рассматриваемой спектральной области эти средние положительные, т.е. расчеты превышают измерения. В области полосы поглощения озона ($\sim 1040 \text{ см}^{-1}$) средние разности отрицательны. Стандартные отклонения и среднеквадратические разности в среднем составляют $2\text{--}4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{см}^{-1})$ и максимальны в окне прозрачности и в центре полосы поглощения CO_2 при 667 см^{-1} . В терминах яркостной температуры излучения средние разности, как правило, не превышают $1\text{--}2 \text{ К}$. В большинстве случаев средние разности положительны. Стандартное отклонение разности и среднеквадратичные разности яркостных температур близки к $2\text{--}4 \text{ К}$, за исключением центра полосы CO_2 и области поглощения озона, где они достигают $\sim 5 \text{ К}$. Минимальные значения СОР и СКР наблюдаются в области полосы поглощения CO_2 при 15 мкм , что связано с использованием в расчетах радиозондовых измерений температуры и влажности, соответствующих измерениям уходящего излучения. Проведенные ранее сравнения расчетов

и измерений прибора ИКФС-2 показали, что средние рассогласования, СОР и СКР меньше примерно на $1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \times \text{ср} \times \text{см}^{-1})$, или на 1 К в терминах яркостной температуры излучения, чем в случаях сравнений с прибором SI-1. При этом и в сравнениях с ИКФС-2 расчет дает большие значения, чем эксперименты.

2. Сравнения экспериментальных спектров разных лет показали, что уходящее излучение, измеренное ИКФС-2, в среднем меньше соответствующего излучения по данным измерений прибором SI-1 примерно 40 лет назад, особенно в области 15-мкм полосы CO_2 . Этот эффект может быть связан с увеличением содержания в атмосфере углекислого газа за 40 лет и вызванным этим смещением излучающих слоев атмосферы вверх, в слои тропосферы с меньшей температурой.

3. Противоположный эффект в центре полосы поглощения 15 мкм CO_2 — превышение уходящего излучения, измеренного ИКФС-2, — подтверждает этот вывод. Противоположные эффекты возникают за счет различного знака высотного градиента температуры в тропосфере и стратосфере.

Данное исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 17–05–00768.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асмус В.В., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Успенский А.Б., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В., Пяткин В.П., Русин Е.В. Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК фурье-спектрометра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 53. № 4. С. 487–492.
- Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК фурье-спектрометра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 493–501.
- Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37.
- Козлов Д.А., Тимофеев Ю.М., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Поляков А.В., Делер В., Ортель Д., Шпенкух Д. Методика пересчета спектров уходящего теплового ИК-излучения к произвольному спектральному разрешению // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса (в печати).
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 280 с.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А., Успенский А.Б., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Козлов Д.А.,

- Рублев А.Н., Кухарский А.В. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. 1. Анализ измерений спектров уходящего излучения // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 71–78.
- Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- 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 // *Atm. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 6687–6711.
- 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. Quant. Spectrosc. Radiat.* 2004. V. 18. P. 810–822.
- Aumann H.H., Miller C. Atmospheric infrared sounder (AIRS) on the Earth Observing System: Advanced and next-generation satellites // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2583. P. 332–338.
- Clough S.A., Iacono M.J. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates II: Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide, and the halocarbons // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 16,519–16,535.
- Glumb R.J., Williams F.L., Funk N., Chateaufneuf F., Roney A., Allard R. Cross-track Infrared Sounder (CrIS) development status // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5152. P. 1–8.
- Goody R., Haskins R. Calibration of radiances from space // *J. Clim.* 1998. V. 11. P. 754–758.
- Hanel R., Conrath B. Preliminary results from the interferometer experiment on Nimbus III // *Science.* 1969. V. 165. № 3899. P. 1258–1260.
- Harries J.E., Brindley H.E., Sago 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.
- Kempe V. Satellite-Fourier-spectrometer for Meteor-25: design problems and mission // *Acta Astron.* 1980. V. 7. P. 893–902.
- Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., and Jahn H. Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // *Acta Astron.* 1980. V. 7. № 12. P. 1403–1416.
- LBLRTM 12.1: LBLRTM Description. 2011. http://rtweb.aer.com/lblrtm_description.html.
- Ogawa T., Shimoda H., Hayashi M., Imasu R., Ono A., Nishinomiya S., Kobayashi H. IMG: Interferometric measurement of greenhouse gases from space // *Adv. Space. Res.* 1994. V. 14. № 1. P. 25–28.
- Phulpin T., Blumstein D., Prel F., Tournier B., Prunet P., Schluessel P. Applications of IASI on MetOp-A: first results and illustration of potential use for meteorology, climate monitoring, and atmospheric chemistry // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6684, article id. 66840F. 12 p.
- Theodore B., Coppens D., Döhler W., Damiano A., Oertel D., Klaes D., Schmetz J., Spänkuch D. Exploitation of SI-1 data from Meteor-28 and 29 spacecraft for climate purposes // *Proc. the 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, 21–25 September 2015, Toulouse, France.
- Wark D.Q., Hilleary D.T. Atmospheric temperature: successful test of remote probing // *Science.* 1969. V. 165. № 3899. P. 1256–1258.

Comparison of Outgoing IR Radiation Spectra Measured in Different Years

Yu.M. Timofeev¹, A.V. Polyakov^{1,*}, D.A. Kozlov², W. Döhler³, D. Oertel⁴, D. Spänkuch^{3,5}

¹ Saint-Petersburg State University, Russia

² SSC «Keldysh Research Centre», Moscow

³ formerly in GDR Meteorological service

⁴ Formerly in Space Research Institute of AS GDR

⁵ Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

E-mail: *a.v.polyakov@spbu.ru

Comparisons of outgoing IR radiation spectra measured by Fourier SI-1 spectrometer in 1977 and 1979 from the Meteor-28 and -29 satellites to numerical calculations on the basis of the modern LBLRTM code and data of atmospheric radio sounding are carried out. In most cases, mean differences between measurements and calculations do not exceed $2 \text{ mW}/(\text{m}^2 \times \text{sr} \times \text{cm}^{-1})$ in the $660\text{--}1600 \text{ cm}^{-1}$ spectral range. Standard deviations and mean square differences are, on average, $2\text{--}4 \text{ mW}/(\text{m}^2 \times \text{sr} \times \text{cm}^{-1})$. These values are greater by about $1 \text{ mW}/(\text{m}^2 \times \text{sr} \times \text{cm}^{-1})$ than relevant differences between calculations and measurements for modern IKFS-2 spectrometer. Comparisons of experimental spectra of 1977, 1979 and 2015–2016 have shown that, on average, the intensity of outgoing IR radiation measured by the IKFS-2 device, is by $0.5\text{--}3.0 \text{ mW}/(\text{m}^2 \times \text{sr} \times \text{cm}^{-1})$ less than SI-1 radiation measurements onboard Meteor-28 and -29 satellites obtained 40 years ago. This effect may be associated with the CO_2 increase in the atmosphere and the resulting raising of radiating atmosphere layers to tropospheric layers with a smaller temperature.

Keywords: outgoing thermal radiation, Fourier-spectrometers SI-1 and IKFS-2, climate change

REFERENCES

- 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 // *Atm. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 6687–6711.
- 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. Quant. Spectrosc. Radiat.* 2004. V. 18. P. 810–822.
- Asmus V.V., Timofeyev Yu.M., Polyakov A.V., Uspenskiy A.B., Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Kozlov D.A., Rublev A.N., Kukharskiy A.V., Pyatkin V.P., Rusin Ye.V.* Temperaturnoye zondirovaniye atmosfery po dannym sputnikovogo IK fur'ye-spektrometra [Temperature sounding of the atmosphere from the satellite IR Fourier spectromete] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana.* 2016. T. 53. № 4. S. 487–492. (In Russian).
- Aumann H.H., Miller C.* Atmospheric infrared sounder (AIRS) on the Earth Observing System: Advanced and next-generation satellites // *Proc. SPIE.* 1995. V. 2583. P. 332–338.
- Clough S.A., Iacono M.J.* Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates II: Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide, and the halocarbons // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 16,519–16,535.
- Garkusha A.S., Polyakov A.V., Timofeyev Yu. M., Virolaynen Ya. A.* Opredeleniye obshchego sodержaniya ozona po dannym izmereniy sputnikovogo IK Fur'ye-spektrometra [Determination of the total ozone content from measurements of the satellite IR Fourier spectrometer] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana.* 2017. T. 53. № 4. S. 493–501. (In Russian).
- Glumb R.J., Williams F.L., Funk N., Chateauneuf F., Roney A., Allard R.* Cross-track Infrared Sounder (CrIS) development status // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5152. P. 1–8.
- Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Nikulin A.G., Kozlov D.A., Monakhov D.O., Kozlov I.A., Arkhipov S.A., Tselikov V.A., Romanovskiy A.S.* Bortovyye infrakrasnyye Fur'ye-spektrometry dlya temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli [Onboard infrared Fourier spectrometers for temperature-humidity sounding of the Earth's atmosphere] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2013. № 6. S. 25–37. (In Russian).
- Goody R., Haskins R.* Calibration of radiances from space // *J. Clim.* 1998. V. 11. P. 754–758.
- Hanel R., Conrath B.* Preliminary results from the interferometer experiment on Nimbus III // *Science.* 1969. V. 165. № 3899. P. 1258–1260.
- 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. V. 410. P. 355–357.
- Kempe V.* Satellite-Fourier-spectrometer for Meteor-25: design problems and mission // *Acta Astron.* 1980. V. 7. P. 893–902.
- 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 Astron.* 1980. V. 7. № 12. P. 1403–1416.
- Kozlov D.A., Timofeyev Yu.M., Zavelevich F.S., Golovin Yu.M., Polyakov A.V., Deler V., Ortel' D., Shpenkukh D.* Metodika perescheta spektrov ukhodyashchego teplovogo IK izlucheniya k proizvol'nomu spektral'nomu razresheniyu [Method for recalculating the spectra of outgoing thermal IR radiation to an arbitrary spectral resolution] // *Sovr. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa (v pechati).* (In Russian).
- Kondrat'yev K.Ya., Timofeyev Yu.M.* Meteorologicheskoye zondirovaniye atmosfery iz kosmosa. [Meteorological sounding of the atmosphere from space.] L.: Gidrometeoizdat, 1978. 280 s. (In Russian).
- LBLRTM 12.1: LBLRTM Description. 2011. http://rtweb.aer.com/lblrtm_description.html.
- Ogawa T., Shimoda H., Hayashi M., Imasu R., Ono A., Nishinomiya S., Kobayashi H.* IMG: Interferometric measurement of greenhouse gases from space // *Adv. Space. Res.* 1994. V. 14. № 1. P. 25–28.
- Phulpin T., Blumstein D., Prel F., Tournier B., Prunet P., Schluessel P.* Applications of IASI on MetOp-A: first results and illustration of potential use for meteorology, climate monitoring, and atmospheric chemistry // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6684, article id. 66840F. 12 p.
- Polyakov A.V., Timofeyev Yu.M., Virolaynen Ya.A., Uspenskiy A.B., Zavelevich F.S., Golovin Yu.M., Kozlov D.A., Rublev A.N., Kukharskiy A.V.* Sputnikovyy atmosferyy zondirovshchik IKFS-2. 1. Analiz izmereniy spektrov ukhodyashchego izlucheniya [Satellite atmospheric sounder IRFS-2. 1. Analysis of measurements of the outgoing radiation spectra] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2016. № 5. S. 71–78. (In Russian).
- Theodore B., Coppens D., Döhler W., Damiano A., Oertel D., Klaes D., Schmetz J., Spänkuch D.* Exploitation of SI-1 data from Meteor-28 and 29 spacecraft for climate purposes // *Proc. the 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf., 21–25 September 2015, Toulouse, France.*
- Timofeyev Yu.M., Vasil'yev A.V.* Teoreticheskiye osnovy atmosferno optiki. [Theoretical basis of atmospheric optics.] SPb.: Nauka, 2003. 474 s. (In Russian).
- Wark D.Q., Hilleary D.T.* Atmospheric temperature: successful test of remote probing // *Science.* 1969. V. 165. № 3899. P. 1256–1258.