

СПУТНИКОВЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ ЗОНДИРОВЩИК ИКФС-2

1. АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ УХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2016 г. А. В. Поляков^{1*}, Ю. М. Тимофеев¹, Я. А. Виrolайнен¹, А. Б. Успенский²,
Ф. С. Завелевич³, Ю. М. Головин³, Д. А. Козлов³, А. Н. Рублев², А. В. Кухарский²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва

³ФГУП “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша”, Москва

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

Поступила в редакцию 09.06.2015 г.

Анализируются спектры уходящего теплового излучения, полученные с помощью прибора ИКФС-2 с борта спутника “Метеор-М” № 2. Получены статистические характеристики более 10^6 спектров, измеренных весной 2015 г. Яркостная температура излучения меняется от ~ 300 К (температура поверхности) до ~ 210 К (температура тропопаузы). Показана достаточно высокая изменчивость излучения в длинноволновой области измерений. Отношение сигнал/шум заметно падает в коротковолновой области (более 1300 см^{-1}). Сравнения спектров ИК-зондировщиков ИКФС-2 с приборами IASI-A и CrIS показали, что различия как средних спектров, так и их вариаций не превышают погрешности измерений в спектральной области $660\text{--}1300 \text{ см}^{-1}$. Сравнение подобранных пар синхронно измеренных спектров показали отличия от измерений европейских приборов в области 15 мкм полосы CO_2 и окна прозрачности $8\text{--}12 \text{ мкм}$ менее $1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$, и не больше взаимных различий между измерениями двух экземпляров прибора IASI (-A и -B). Различия экспериментальных и моделированных спектров в средней части полосы 15 мкм полосы поглощения CO_2 не превышают $\sim 1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$; однако, начиная с 720 см^{-1} , появляются значения, которые достигают $2\text{--}4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$. Это обусловлено невозможностью точного задания параметров поверхности. Требуется дальнейший анализ причин наблюдающихся различий для возможного уточнения как методики первичной обработки измерений, так и радиационной модели.

Ключевые слова: тепловое излучение, ИК-радиация, спутниковое зондирование, Фурье-спекрокопия, Фурье-спектрометрия

DOI: 10.7868/S0205961416040059

ВВЕДЕНИЕ

Идеи использования измерений уходящего теплового излучения Земли для дистанционного определения вертикальных профилей температуры атмосферы были впервые высказаны в 1950-х гг. (например, (Karlan, 1959)). Первые космические эксперименты по реализации спектрального метода температурного зондирования из космоса были успешно проведены на метеорологическом искусственном спутнике Земли (МИСЗ) Nimbus-3 в 1969 г. (Wark, Hilleary, 1969; Hanel, Conrath, 1969). В СССР первые эксперименты по термическому зондированию атмосферы были осуществлены в 1971 г. (Пахомов и др., 1971). В дальнейшем продолжились многочисленные теоретические и экспериментальные исследования дистанционного метода, а также аппаратные разработки, одной из основных целей которых было выполнение достаточно жестких требований к точности и верти-

кальному разрешению результатов спутникового зондирования – профилей температуры (Успенский, 2013; Smith et al., 2009).

В июле 2014 г. был запущен новый российский метеорологический спутник “Метеор-М” № 2, на борту которого находится разнообразная аппаратура для дистанционного зондирования (ДЗ) атмосферы и поверхности Земли, в том числе Фурье-спектрометр ИКФС-2, предназначенный для получения информации об атмосфере и поверхности для численных прогнозов погоды и изучения современных изменений климата Земли (Асмус и др., 2014). Основные технические характеристики Фурье-спектрометра ИКФС-2 приведены в таблице (Завелевич и др., 2009; Головин и др., 2013).

Аппаратура ИКФС-2 по назначению и основным характеристикам близка к известным приборам IASI (Chalon et al., 2001) и CrIS

Основные технические характеристики прибора ИКФС-2

| Параметр | Значение |
|--|-----------------|
| Рабочий спектральный диапазон, мкм (см^{-1}) | 5–15 (660–2000) |
| Спектральное разрешение (неаподизированное), см^{-1} | 0.4 |
| Спектральная плотность энергетической яркости, эквивалентная шуму, NESR(ν), $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$ | 0.1–0.3 |
| Полоса обзора, км | 1000–2500 |
| Шаг пространственной сетки, км | 60–110 |
| Пространственное разрешение в надире, км | 30 |
| Информативность, Кб/с | 600 |
| Масса прибора, кг | 50 |
| Энергопотребление в рабочем режиме, Вт | 50 |

(<http://www.ipc.noaa.gov>, 2011). Исходя из основной области применения указанных приборов и достаточно высокого спектрального разрешения,

их принято называть в отечественной и зарубежной литературе гиперспектральными ИК-зондировщиками.

Для интерпретации спектров уходящего излучения Земли, измеренных ИК-зондировщиком ИКФС-2, были разработаны методики, алгоритмы и программно-математическое обеспечение тематической обработки данных ИКФС-2. На основе численного моделирования были подробно исследованы точностные характеристики измерений ИКФС-2, а также оценены погрешности результатов тематической обработки – вертикальных профилей температуры, влажности, содержания озона и ряда парниковых газов, температуры суши и океанов (Поляков и др., 2009, 2014). Данная статья посвящена анализу результатов первого важного этапа – анализу качества измеренных ИК-зондировщиком ИКФС-2 спектров уходящего теплового излучения системы атмосфера–поверхность.

СПЕКТРЫ УХОДЯЩЕГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ

На рис. 1а (цветная версия всех рисунков к статье представлена по ссылке http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Polyakov/color_figures_IKFS_1.docx) показаны некоторые статистические характеристики спектров интенсивности уходящего излучения, измеренных прибором ИКФС-2 в различных регионах земного шара и при различной облачности весной 2015 г., в течение ~20 дней измерений в период 4 февраля–5 апреля. Для получения этих характеристик использовалось более 10^6 спектров.

Рисунок 1а наглядно демонстрирует изменчивость излучения, обусловленную изменением температуры, влажности, а также наличием облаков и изменчивостью их характеристик в земной атмосфере в поле зрения прибора. Максимальные значения уходящего теплового излучения на-

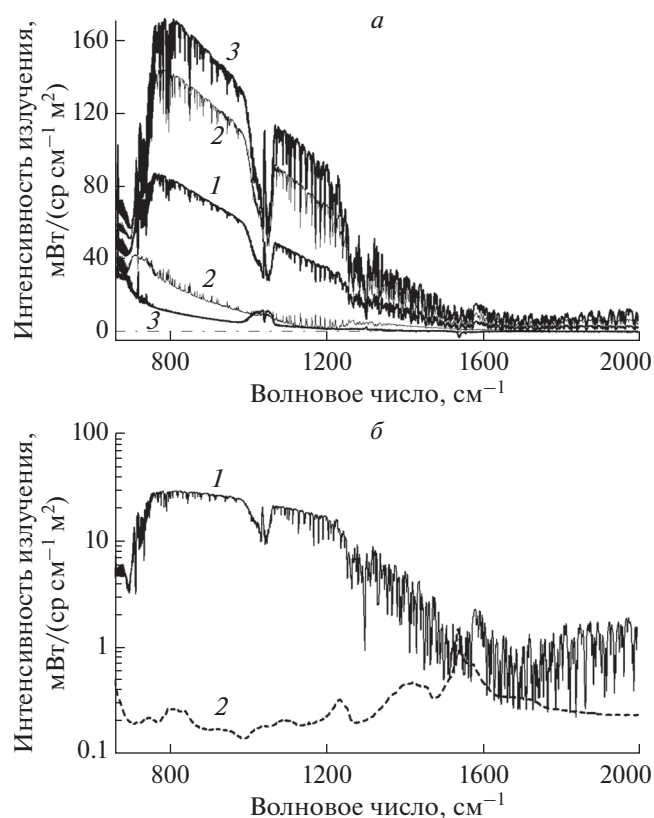


Рис. 1. Статистические характеристики спектров уходящего теплового ИК-излучения системы атмосфера–поверхность, измеренных прибором ИКФС-2 в различных регионах земного шара в период февраль–апрель 2015: *a*: 1 – средний спектр, 2 – “коридор 2” – область наиболее вероятных значений, содержит 95% всех данных, 3 – минимальные и максимальные значения; *б*: 1 – стандартное отклонение интенсивности излучения, 2 – среднеквадратичная погрешность ее измерения.

блюдаются в окне прозрачности 8–12 мкм, в котором четко выделяется полоса поглощения озона вблизи 9.6 мкм. Минимумы интенсивности излучения в этой области связаны с низкими температурами нижней стратосферы, а максимум излучения в центре полосы – с более высокими температурами тропосферы. Интерпретация измерений в этой полосе позволяет определять общее содержание озона в земной атмосфере, а также элементы его вертикального распределения. Наиболее прозрачные области окна прозрачности используются для определения температуры поверхности океанов, а также температуры и излучательной способности суши. В длинноволновой области 13–15 мкм расположена сильная полоса поглощения CO_2 , используемая для определения вертикального профиля температуры от поверхности Земли до высот 30–40 км. Многочисленные области поглощения и излучения водяного пара используются для получения информации о влагосодержании атмосферы. Как показано в работе (Поляков и др., 2010), измеренные спектры несут в себе определенную информацию о содержании такого важного парникового газа как метан, а при определенных условиях и других парниковых газов.

На рис. 1б приведены стандартное отклонение и осредненные с квадратом погрешности измерений (погрешности меняются со временем) того же набора спектров. Они наглядно демонстрируют соотношение между полезным сигналом – изменчивостью регистрируемой интенсивности излучения – и шумом измерений. В частности, из рисунка видно, что информативность прибора, высокая в длинноволновой части спектральной области измерений, существенно снижается в его коротковолновой части, начиная примерно с $1300\text{--}1400\text{ см}^{-1}$, что обусловлено использованием в приборе одного приемника, относительно малочувствительного в коротковолновой области.

На рис. 2 приведены примеры измеренных спектров в терминах яркостной температуры излучения. Они наглядно демонстрируют пространственно-временную изменчивость кинетической температуры атмосферы и поверхности. Эта температура меняется по пространству и спектру от $\sim 300\text{ К}$ (температура поверхности) до $\sim 210\text{ К}$ (температура тропопаузы). Вариации яркостной температуры по спектру отражают вертикальные вариации температуры в тропосфере и стратосфере. Так, например, минимум яркостной температуры в средней части коротковолнового крыла 15 мкм полосы CO_2 отражает температуру на уровне тропопаузы, а максимум яркостной температуры в центре 15 мкм полосы температуру верхней стратосферы.

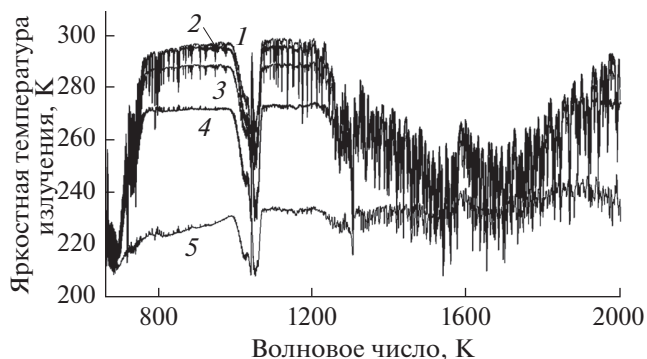


Рис. 2. Примеры спектров уходящего теплового ИК-излучения системы атмосфера–поверхность в терминах яркостной температуры, измеренные прибором ИКФС-2 в различных регионах земного шара 16 и 17 марта 2015 г. Сверху вниз: 1 – Атлантический океан у побережья Южной Америки вблизи устья р. Коррентайн; 2 – Атлантический океан у побережья Африки; 3 – Южная Африка, высота поверхности 900 м; 4 – Всеволожский р-н, Ленинградская обл.; 5 – Северный Ледовитый океан, 100%-ная облачность.

СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИК-ЗОНДИРОВЩИКОВ ИКФС-2 И IASI

Представляет большой интерес и практическую ценность сопоставление спектров, измеренных ИКФС-2, с данными измерений подобных приборов, функционирующих в настоящее время на зарубежных метеоспутниках. Такие сравнения очень важны для взаимной калибровки различных систем спутникового зондирования. На рис. 3а приведены сравнения средних спектров уходящего излучения системы атмосфера–поверхность для приборов ИКФС-2, IASI-A (европейский спутник Metop-A) и CrIS (спутник SNPP, США) для спектральной области 15 мкм полосы углекислого газа ($660\text{--}800\text{ см}^{-1}$). Эти данные получены на основе использования большого количества индивидуальных спектров излучения (десятки и сотни тысяч), зарегистрированных приборами в течение 5–6 февраля 2015 г. над одной и той же территорией – поверхностью Земли от Северного до Южного полюса – в одинаковом диапазоне зенитных углов наблюдений. Отметим, что для корректного сопоставления спектры аппаратуры IASI были приведены к спектральной аппаратной функции прибора ИКФС-2.

На рис. 3б приведены отличия среднего спектра прибора ИКФС-2 от средних спектров приборов IASI-B и IASI-A для той же спектральной области 15 мкм полосы CO_2 . Из рисунка следует высокое качество измерений спектров уходящего излучения российским ИК-зондировщиком. Отличия от измерений европейского прибора составляют менее $1\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$ и практически близки к наблюдаемому различию между измерениями двух экземпляров прибора IASI (IASI-A и

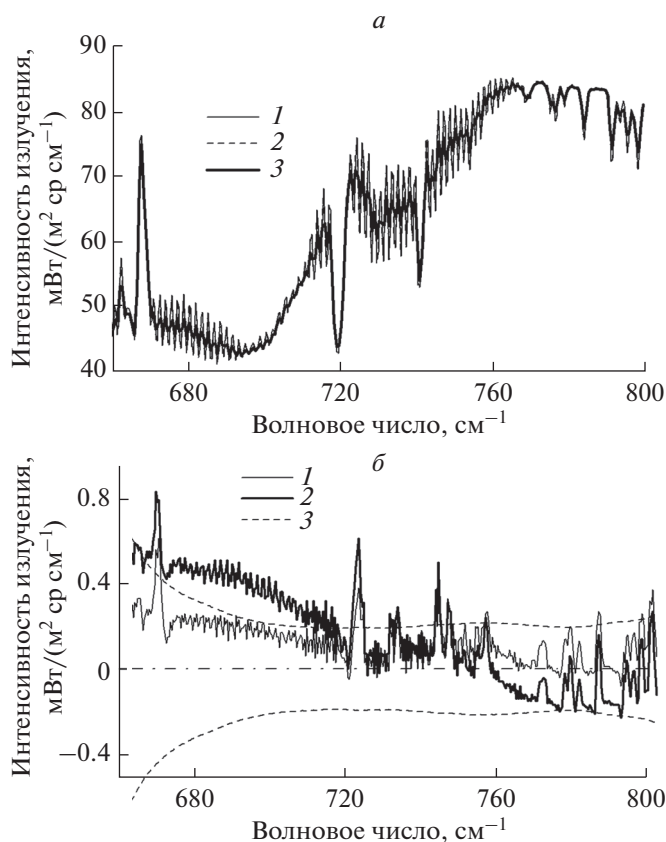


Рис. 3. *a* – Сравнения средних спектров уходящего излучения, измеренных ИК-зондировщиками (1 – ИКФС-2, 2 – IASI-A и 3 – CrIS) для спектральной области 15 мкм полосы углекислого газа и части окна прозрачности; *б* – разности средних спектров (1 – IASI-A и 2 – IASI-B) относительно спектров ИКФС-2 на фоне (3) случайной погрешности измерений ИКФС-2.

IASI-B). Отличия между средними спектрами для ИКФС-2 и IASI-A составляют менее $0.4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ в большей части 15 мкм полосы поглощения. Отметим максимумы отличий в районах Q -ветвей полосы CO_2 (~ 667 и $\sim 720 \text{ см}^{-1}$), где наблюдаются очень быстрые спектральные вариации коэффициентов поглощения углекислого газа. Эти максимумы могут быть вызваны неточностями в согласовании спектральных аппаратных функций приборов, проявляющимися в области быстрых изменений интенсивности излучения по спектру.

Существенно, что приведенные отличия имеют такой же уровень или даже меньше, чем типичная случайная погрешность измерений индивидуальных спектров.

Анализ отличий средних излучений в терминах яркостной температуры для измерений приборов ИКФС-2 и IASI-A и IASI-B в спектральной области $660\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$ показывает, что для большей части рассматриваемой спектральной области отличия для всех трех приборов составляют менее 0.2 К , что находится в пределах суммарных

погрешностей абсолютной калибровки этих приборов. Аналогичное рассмотрение спектральной области окна прозрачности $8\text{--}12 \text{ мкм}$ показывает, что отличия в средних спектрах, полученных различной аппаратурой, не превышают случайный шум измерений.

Для сопоставления качества и информативности измерений важно сравнение не только средних спектров, но и пространственно-временных вариаций уходящего излучения, измеряемых различными спутниковыми приборами. Для описанных выше ансамблей измерений спектров различными приборами были рассчитаны стандартные отклонения (естественные вариации) уходящего излучения. На рис. 4*a* приведены глобальные вариации уходящего теплового излучения по данным измерений ИКФС-2, а на рис. 4*б* – разности вариаций по данным измерений ИКФС-2 и IASI-A и IASI-B. При этих сравнениях спектры прибора IASI были приведены к спектральному разрешению прибора ИКФС-2.

Как следует из рис. 4, отличия в регистрации естественных вариаций уходящего ИК-излучения двумя приборами не превышают $0.5 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$

при величинах этих вариаций, достигающих $30 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$, что свидетельствует о достаточно высоком качестве измерений ИК-зондировщика ИКФС-2. Следует отметить, что с учетом более высокого пространственного разрешения аппаратуры IASI (~ 12 вместо ~ 30 км для ИКФС-2) можно ожидать для спектров, регистрируемых IASI, несомненно большей изменчивости по сравнению со спектрами ИКФС-2, но, по-видимому, преобладание в структуре поверхности Земли однородных площадей (океан, степи, пустыни, леса) нивелирует это увеличение до небольшого различия с максимальными значениями $0.4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ в области $\sim 800 \text{ см}^{-1}$. Как видно, расхождения средних спектров и естественных вариаций уходящего излучения для различных приборов малы, и отсюда следует, что все приборы регистрируют практически одинаковые (в смысле первых и вторых моментов) спектры уходящего теплового излучения.

Для сравнения отдельных спектров были отобраны пары измерений приборов ИКФС-2 и IASI-B в безоблачных условиях, имеющих близкие пространственно-временные координаты и зенитные углы измерений. При отборе выполнялись следующие условия: расстояние между центрами пикселей ИКФС и IASI — не более 20 км, разница во времени не больше 1 ч, различие зенитных углов приборов не более 2° . Проведенный анализ показал, что наблюдаются систематические отличия в измерениях двух приборов в длинноволновой части измерений. Средние разности спектров двух приборов в окне прозрачности составляют $\sim 1\text{--}1.5 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$, имеется область ($1200\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$) с большими хаотическими отличиями, достигающими $2 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$, причем среднеквадратические разности почти полностью определяются систематическим смещением.

СРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕННЫХ И МОДЕЛИРОВАННЫХ СПЕКТРОВ

Важное значение при решении обратных задач ДЗ имеет точность задания радиационной модели переноса ИК-излучения в атмосфере (оператора прямой задачи), используемой, например, при физико-статистическом подходе к получению данных температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) (Кондратьев, Тимофеев, 1978). Численное моделирование измерений спектров, регистрируемых ИК-зондировщиком 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,

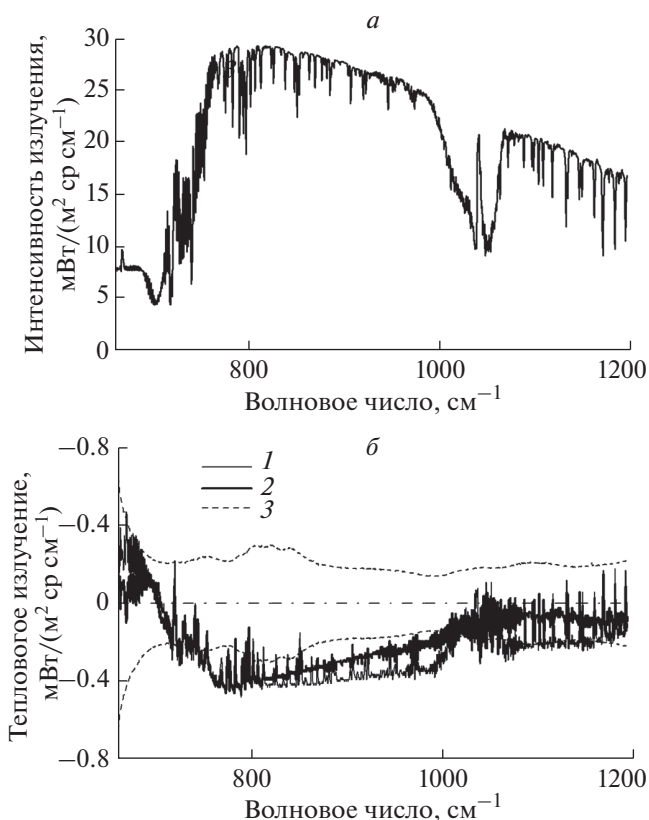


Рис. 4. *a* — Среднеквадратические вариации спектров уходящего теплового излучения по измерениям ИКФС-2; *b* — разность среднеквадратических вариаций спектров уходящего излучения, полученных по измерениям ИКФС-2, IASI-A (1) и IASI-B (2); 3 — погрешность ИКФС-2.

вертикальных профилей температуры, влажности, содержания различных поглощающих газов, аэрозолей, температуры поверхности и ее излучательных способностей, характеристик облаков, а также ряда характеристик спутниковой аппаратуры. Основной источник данных о вертикальных профилях температуры и влажности — радиозондовые измерения. Можно также использовать для этих целей продукты численного прогноза погоды, например, поля анализа метеоэлементов или прогнозы с нулевой заблаговременностью. Для численного моделирования спектров уходящего излучения использовался радиационный код LBLRTM полинейных расчетов (<http://rtweb.aer.com/lblrtm.html>) или быстрый радиационный код типа RTTOV, адаптированный к расчетам спектров ИКФС-2. Следует отметить, что на результатах сопоставлений измеренных и моделированных спектров существенно сказываются погрешности измерений характеристик атмосферы, пространственно-временная согласованность спутниковых и входных данных, а также точность задания физических и оптических характеристик

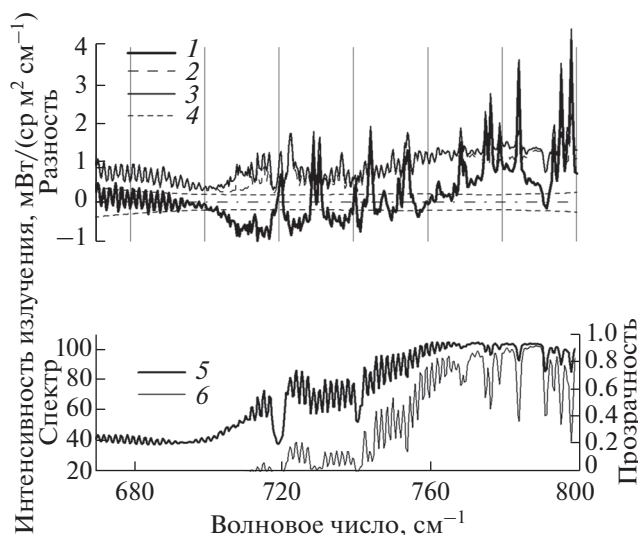


Рис. 5. Сравнение рассчитанных и измеренных спектров уходящего ИК-излучения в области 670–800 см^{-1} (верхние графики). Средний спектр и функции пропускания всей толщи атмосферы (нижние графики): 1 – средняя разность, 2 – стандартное отклонение разности, 3 – среднеквадратичная разность, 4 – погрешность измерений, 5 – типичный спектр, 6 – типичная функция пропускания атмосферы.

поверхности. Для минимизации рассогласований при сравнениях спутниковых и моделированных данных использовались измерения в безоблачных условиях. При этом излучательная способность и температура поверхности, данные по которым отсутствовали, определялись из самих спектральных измерений.

При подборе пар спектров и данных радиозондирования использовались следующие критерии: расстояние не более 100 км, разница во времени не более 6 ч. В результате была сформирована выборка из 62 пар радиозонд-спектров.

Для дополнения профилей выше потолка измерений радиозондов использовались результаты ТВЗА (данные уровня 3), полученные по информации спутника EOS/Aqua (ftp://acdisc.gsfc.nasa.gov/ftp/data/s4pa/Aqua_AIRS_Level3/AIRX3STD.006/).

На рис. 5 приведен пример сопоставлений измерений и модельных расчетов в области полосы CO_2 при 15 мкм, используемой для температурного зондирования атмосферы. На рисунке приведены средние и среднеквадратичные разности для набора сопоставлений в области 670–800 см^{-1} , а также (нижняя часть рисунка) средний спектр уходящего теплового излучения и спектральное поведение функции пропускания всей толщи атмосферы.

Как видно из рис. 5, средние разности в области 670–720 см^{-1} не превышают $\sim 1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$, однако, начиная с 720 см^{-1} , появляются максимумы

отличий с определенной спектральной структурой, которые достигают $2\text{--}4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$. Требуется дальнейшие исследования и коррекция радиационной модели для понимания и устранения причин наблюдающихся отличий и их минимизации. Одной из причин систематических отличий в относительно прозрачных областях полосы поглощения CO_2 могут быть погрешности задания содержания углекислого газа и водяного пара в атмосфере, прежде всего в тропосфере, а также погрешности определения излучательной способности и температуры поверхности.

Стандартное отклонение разности имеет более однородную спектральную структуру. Оно близко к $1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$ в центре полосы 15 мкм и ее средней части (660–720 см^{-1}), где отсутствует вклад в уходящее излучение поверхности (см. нижнюю часть рис. 5), и постепенно увеличивается, достигая $\sim 2 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$ в крыле полосы (720–800 см^{-1}). Отметим, что мы не анализировали участок спектра 660–670 см^{-1} , так как излучение в нем формируется на высотах, данные по которым отсутствуют в использованных источниках. Как следует из анализа согласованности расчетных и экспериментальных значений уходящего излучения, требуются дальнейшие, тщательные исследования причин обнаруженных рассогласований, а также разработки методик оперативной коррекции прямого оператора обратной задачи для достижения высокой точности результатов ТВЗА. Для решения первой из указанных задач чрезвычайно важна организация валидационных программ дистанционных измерений и комплексных подспутниковых экспериментов с измерениями многочисленных физических и оптических характеристик атмосферы и поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены результаты анализа измерений спектров уходящего ИК-излучения с высоким спектральным разрешением с помощью отечественного спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2.

Приведены примеры статистических характеристик спектров интенсивности уходящего излучения, измеренных с помощью ИКФС-2 в различных регионах земного шара и при различной облачности весной 2015 г. Для получения этих характеристик использовался период 4 февраля–5 апреля 2015 г. и измерения более 10^6 спектров. Показана достаточно высокая изменчивость излучения, обусловленная изменением температуры и влажности в атмосфере, а также наличием и характеристиками облаков в земной атмосфере в поле зрения прибора. Сравнения среднеквадратических естественных вариаций спектров уходящего излучения с погрешностями измерений по-

казывает высокую информативность прибора в длинноволновой области измерений. Эта информативность заметно падает в коротковолновой области (более 1300 см^{-1}). Представляется целесообразным в будущем добавления приемника, чувствительного в коротковолновой части области измерений или исключение коротковолновой области, что позволит уменьшить шум в длинноволновой области путем введения более узкого спектрального фильтра.

Спектры излучения в терминах яркостной температуры излучения демонстрируют пространственно-временную изменчивость кинетической температуры атмосферы и поверхности. Эта температура меняется по пространству и спектру от $\sim 300 \text{ К}$ (температура поверхности) до $\sim 210 \text{ К}$ (температура тропопаузы).

Выполнены сравнения средних спектров уходящего ИК-излучения системы атмосфера—поверхность, измеренных ИК-зондировщиками ИКФС-2, IASI-A и CrIS и их среднеквадратических (естественных) вариаций на основе использования большого количества индивидуальных спектров излучения (десятки тысяч), зарегистрированных приборами в течение 5–6 февраля 2015 г. над одной и той же территорией (от северного до южного полюса) в одинаковом диапазоне зенитных углов наблюдений. Отличия среднего спектра по данным ИКФС-2 от средних спектров по данным IASI-B и IASI-A, а также среднеквадратических вариаций не превышают, как правило, погрешности измерений в спектральной области $600\text{--}1300 \text{ см}^{-1}$. Из этого следует высокое качество измерений уходящего излучения российским ИК-зондировщиком. Отличия от измерений европейских приборов составляют, например, в области 15 мкм полосы CO_2 и окне прозрачности $8\text{--}12 \text{ мкм}$ менее $1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ и практически такие же отличия наблюдаются между измерениями двух приборов IASI-A и IASI-B.

Сравнения экспериментальных и моделированных спектров уходящего излучения показывают расхождения, величины которых зависят от спектральной области. В центре и средней части полосы 15 мкм полосы поглощения CO_2 отличия, как правило, не превышают $\sim 1 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$; однако, начиная с 720 см^{-1} , появляются максимумы отличий с определенной спектральной структурой, которые достигают $2\text{--}4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$. Это, вероятно, обусловлено неточностями задания температуры поверхности и ее излучательной способности. Требуется дальнейший анализ причин наблюдающихся различий для возможного уточнения как методики первичной обработки измерений, так и радиационной модели. Этот анализ и возможные уточнения параметров взаимодействия излучения с системой атмосфера—поверхность планируется провести при проведении

специальных программ валидации спутниковых измерений, при тщательном контроле физических и химических характеристик этой системы.

Исследования качества радиационной модели атмосферы в ИК-области выполнены в Санкт-Петербургском государственном университете на основе финансирования гранта РНФ (проект № 14-17-00096).

В работе использовались данные спутника METEOSAT-10 о маске облачности и результаты измерений приборов IASI-A и IASI-B на спутниках Metop-A и Metop-B, предоставляемые EUMETSAT в открытом доступе на сайте <https://eoportal.eumetsat.int/>.

Благодарим профессора В.Л. Смита (W.L. Smith) за предоставление доступа к данным измерений прибора CrIS на спутнике SNPP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асмус В.В., Загребав В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Фролов А.В., Хайлов М.Н. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии “Метеор-М” // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–16.
- 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.
- Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В., Козлов Д.А., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г., Травников Р.И., Романовский А.С., Архипов С.А., Целиков В.А. Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Тр. Всерос. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” М., ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 г. / Под ред. Н.П. Лаврова, Е.А. Луляна, О.Ю. Лавровой. М.: Азбука-2000, 2009. Вып. 6. Т. I. С. 259–266.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников Л.: Гидрометеоздат, 1970. 410 с.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 280 с.
- Пахомов Л.А., Тимофеев Ю.М., Шкляревский В.Г., Покровский О.М. Опыт термического зондирования на искусственном спутнике Земли “Метеор” // Метеорология и гидрология. 1971. № 11. С. 5–8.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. Применение искусственных нейронных сетей в температурно-влажностном зондировании атмосферы // Изв. РАН ФАО. 2014. Т. 50. № 3. С. 373–380.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 3–10.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 3–11.

Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.

Успенский А.Б., Рублев А.Н. Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 4–15.

Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp

sounder // Atmos. Chem. Phys. 2009.V. 9. P. 6041–6054, doi 10.5194/acp-9-6041-2009

Hanel R., Conrath B. Preliminary Results from the Interferometer Experiment on Nimbus III // Science. 1969. V. 165. № 3899. P. 1258–1260.

Kaplan L.D. Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements // JOSA. 1959. V. 49. № 10. P. 1004–1006. doi 10.1364/JOSA.49.001004

Smith W.L., Revercomb H., Bingham G., Larar A., Huang H., Zhou D., Li J., Liu X., Kireev S. Technical note: Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 5563–5574.

Wark D.Q., Hilleary D.T. Atmospheric temperature: Successful test of remote probing // Science. 1969. V. 165. № 3899. P. 1256–1258.

Satellite Atmospheric Sounder IRFS-2

1. Outgoing Radiation Spectra Measurement Analysis

A. V. Polyakov¹, Yu. M. Timofeyev¹, Ya. A. Virolainen¹, A. B. Uspensky², F. S. Zavelevich³,
Yu. M. Golovin³, D. A. Kozlov³, A. N. Rublev², A. V. Kukharsky²

¹Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

²State Research Center “Planeta”, Moscow

³SSC “Keldysh Research Centre”, Moscow

The outgoing radiation spectra which were measured by IRFS-2 spectrometer onboard “Meteor-M” № 2 have been analyzed. Some statistical parameters of more than 10^6 spectra measured in spring of 2015 have been calculated. The radiation brightness temperature has been varied from ~ 300 K (surface temperature) up to ~ 210 K (tropopause temperature). A variability of the longwave measured region radiation has been demonstrated to be high enough. A signal/noise relation is appreciably goes down in the shortwave region (shorter than 1300 cm^{-1}). Intercomparisons of IR sounders IRFS-2, IASI and CrIS spectra showed that the discrepancies of the mean spectra and the spectra variability are no more than measurement errors in the spectral region $660\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$. The comparison of specially chosen pairs of the simultaneously measured spectra showed that the differences between IRFS-2 and European instruments in the region of the 15 microns CO_2 band and the transparency windows $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ are less than the differences between two instruments IASI (-A и -B). The differences between measured and simulated spectra are less than $1\text{ mWt}/(\text{m}^2\text{ sr cm}^{-1})$ in the mean part of CO_2 band, but after 720 cm^{-1} appear values up to $2\text{--}4\text{ mWt}/(\text{m}^2\text{ sr cm}^{-1})$. The reason is an absent of the precise information about a surface temperature. The further investigation of the radiation model of atmosphere need in order to understand the reasons of the differences and to decrease the differences.

Keywords: thermal radiation, IR radiation, satellite sounding of the atmosphere, Fourier spectroscopy, Fourier spectrometry