

УДК 551.508.953: 551.524

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

© 2017 В. В. Асмус^{а, *}, Ю. М. Тимофеев^{б, *}, А. В. Поляков^{б, *}, А. Б. Успенский^{а, **}, Ю. М. Головин^с, Ф. С. Завелевич^с, Д. А. Козлов^с, А. Н. Рублев^а, А. В. Кухарский^а, В. П. Пяткин^д, Е. В. Русин^с

^аНаучно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “ПЛАНЕТА”
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 7

^бСанкт-Петербургский государственный университет
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

^сИсследовательский центр имени М. В. Келдыша
125438 Москва, Онежская ул., 8

^дИнститут вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6

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

**E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Поступила в редакцию 14.03.2016 г.

После доработки 29.03.2016 г.

Предварительные результаты космического эксперимента с ИК-зондировщиком ИКФС-2 (спутник “Метеор-М” № 2) показали высокое качество измерений спектров уходящего теплового излучения системы атмосфера-поверхность и адекватность разработанных ИК радиационных моделей атмосферы в 15 мкм полосе поглощения углекислого газа, используемой для восстановления вертикальных профилей температуры атмосферы. Спектры уходящего излучения, измеренные с помощью аппаратуры ИКФС-2, позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры с погрешностями, близкими к 1К в большей части высотной области 0–30 км, за исключением нижней тропосферы и высот более 30 км, где эти погрешности близки к 2–3К.

Ключевые слова: дистанционное спутниковое зондирование, температура атмосферы, ИК Фурье-спектрометр ИКФС-2, быстрые радиационные модели.

DOI: 10.7868/S0003351517040067

1. Идея использования измерений спектров уходящего теплового ИК-излучения Земли для дистанционного определения вертикальных профилей температуры атмосферы была впервые высказана в 50-х гг. прошлого столетия [1, 2]. Первые эксперименты по реализации спектрального метода температурного зондирования из космоса были успешно проведены на метеорологическом космическом аппарате (КА) NIMBUS-3 в 1969 г. [3, 4]. В СССР первые эксперименты по термическому зондированию атмосферы были осуществлены в 1971 г. [5], а в период 1983–1988 гг. функционировала система дистанционного температурного зондирования атмосферы по данным ИК спектрорадиометров, установленных на оперативных полярно-орбитальных метеоспутниках серии “Метеор-2” (NN 9–17) [6]. При этом точность и вертикальное разрешение спутниковых зондирований по данным зарубежных и отечественных метеорологических КА уступали

аналогичным характеристикам данных аэрологического зондирования. В дальнейшем за рубежом и в нашей стране были проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, а также аппаратные разработки, целью которых было выполнение требований пользователей (см. сайт Всемирной метеорологической организации, раздел User requirements for observation http://wmo.sat.info/Oscar/observing_requirements). В частности, для целей глобального численного прогноза погоды данные температурного зондирования должны иметь точность не хуже 1К и вертикальное разрешение ~ 1 км в тропосфере.

В июле 2014 г. был запущен КА «Метеор-М» № 2 – второй полярно-орбитальный метеоспутник серии “Метеор-М”, см. [8]. Заказчиком спутников серии “Метеор-М” и оператором бортовой целевой аппаратуры является Росгидромет (НИЦ «Планета»). На борту КА находится разнообразная

целевая аппаратура для дистанционного зондирования параметров атмосферы и поверхности Земли, в том числе ИК Фурье-спектрометр ИКФС-2, созданный в ГНЦ “Центр Келдыша”. Основные технические характеристики аппаратуры ИКФС-2, полученные при наземной калибровке и подтвержденные в ходе летных испытаний КА “Метеор-М” № 2, приведены в таблице [9, 10]. Отметим достаточно широкую спектральную область измерений уходящего теплового излучения (5–15 мкм) и высокое спектральное разрешение (0.4 см^{-1}) при низком уровне случайных погрешностей измерений ($0.15\text{--}0.4 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$). Спектр уходящего ИК-излучения, регистрируемый Фурье-спектрометром ИКФС-2, содержит более 2000 каналов.

Основные технические характеристики прибора ИКФС-2

Параметр	Значение
Рабочий спектральный диапазон	5–15 мкм (660–2000 см^{-1})
Спектральное разрешение	0.4 см^{-1}
Спектральная плотность энергетической яркости, эквивалентная шуму, NESR(ν)	$0.1\text{--}0.3 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$
Полоса обзора	1000–2500 км
Пространственное разрешение в надире	35 км

Согласно результатам численного моделирования и спутниковых экспериментов последних лет [7, 11], высокое спектральное разрешение и большое количество спектральных каналов измерений ИКФС-2 достаточны для достижения точности и вертикального разрешения восстановленных профилей температуры, упомянутых выше. Косвенным подтверждением этому являются исследования информативности данных ИКФС-2, приведенные в [12].

2. Для решения обратных задач дистанционного зондирования атмосферы используются данные спутниковых измерений, прошедшие радиометрическую и спектральную калибровку. Бортовая радиометрическая калибровка осуществляется с помощью периодических измерений прибором излучения космоса (нулевое излучение в ИК-области спектра) и имитатора абсолютно черного тела при известной температуре. Спектральная калибровка (привязка к шкале волновых чисел) выполняется с использованием референсного лазера, также входящего в состав прибора.

Качество бортовой радиометрической и спектральной калибровки измерений ИКФС-2 характеризует рис. 1. На нем даны средние разности

и стандартные отклонения между измерениями спектров прибором ИКФС-2 и функционирующим с 2006 г. гиперспектральным ИК-зондировщиком IASI. Интерферометр IASI, установленный на европейских КА серии Metop, обладает высокоточной и стабильной системой радиометрической калибровки, которая позволяет использовать IASI в качестве эталонного прибора для интеркалибровки различной спутниковой ИК аппаратуры [7]. При сравнениях использовались измерения с разницей по времени около 20 минут, расстояние между центрами пикселей ИКФС-2 и IASI составляло не более 10 км, разница зенитных углов измерений – не более 2° . Все измерения были проведены над водной поверхностью в широтном поясе 65S–65N. Как видно из приведенного рисунка, для спектральной области 15 мкм полосы поглощения CO_2 ($660\text{--}750 \text{ см}^{-1}$), используемой для температурного зондирования атмосферы, средние (кривая 2 на рис. 1) и среднеквадратичные (кривая 3 на рис. 1) разности близки или даже меньше NESR – спектральной плотности энергетической яркости, эквивалентной шуму измерений ИКФС-2, среднеквадратичной за период сопоставлений 22–23 августа (кривая 1 на рис. 1), что свидетельствует о высокой точности радиометрической калибровки прибора.

3. Для анализа и интерпретации (“обращения”) данных измерений ИКФС-2, т.е. получения продуктов атмосферного зондирования требуется создание быстрых и высокоточных процедур радиационных расчетов, известных в литературе как “быстрые радиационные модели” или БРМ. Такая БРМ, разработанная на основе известной БРМ RTTOV (<https://nwpsaf.eu/site/software/rttov/>), позволяет с необходимой точностью и высоким быстродействием численно моделировать измеряемые с помощью ИКФС-2 спектры уходящего излучения и их вариации в зависимости от вариаций параметров атмосферы и поверхности [13].

На рис. 2 приведены средние разности измеренных и рассчитанных с помощью БРМ из [13] спектров уходящего излучения в полосе поглощения CO_2 для большого ансамбля атмосферных состояний. Из приведенного рисунка видно, что систематические отличия между модельными и фактическими измерениями ИКФС-2 составляют менее $0.5 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ так же, как для IASI-A и IASI-B. Большие отличия в каналах вблизи центра полосы поглощения CO_2 (667 см^{-1}) обусловлены отсутствием высокоточной информации о температуре стратосферы на высотах 30–50 км, т.е. в области, где формируется уходящее ИК-излучение для указанного спектрального интервала.

На рис. 3 приведено сравнение расчетных и измеренных спектров в окне прозрачности 8–12 мкм.

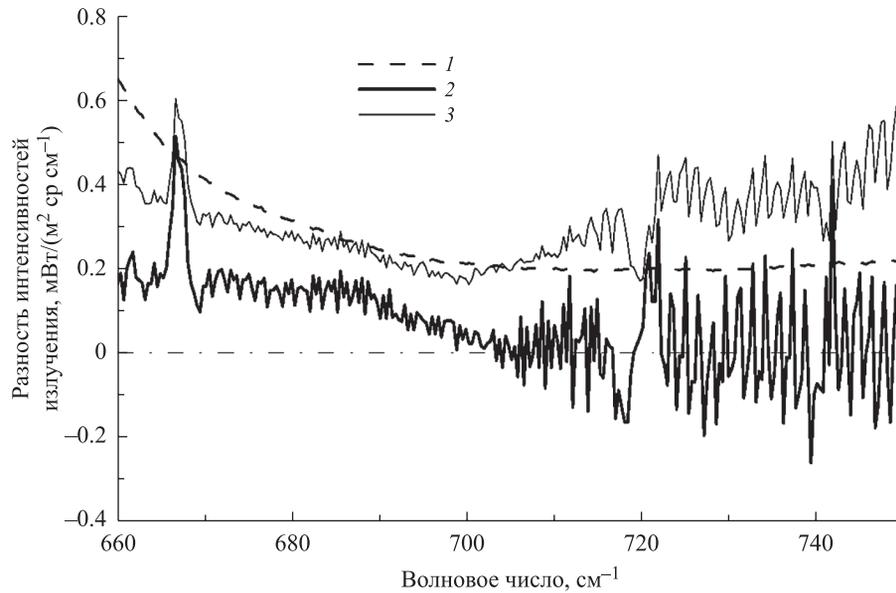


Рис. 1. Средняя разность и стандартное отклонение разности измерений ИКФС-2 и IASI в подобранных парах 22–23 июля 2015 г. Обозначения кривых: 1 – NESR ИКФС-2, среднеквадратичная величина по всем сравнениям, 2 – средняя разность измеренных интенсивностей излучения, ИКФС-2 минус IASI, 3 – среднеквадратичная разность.

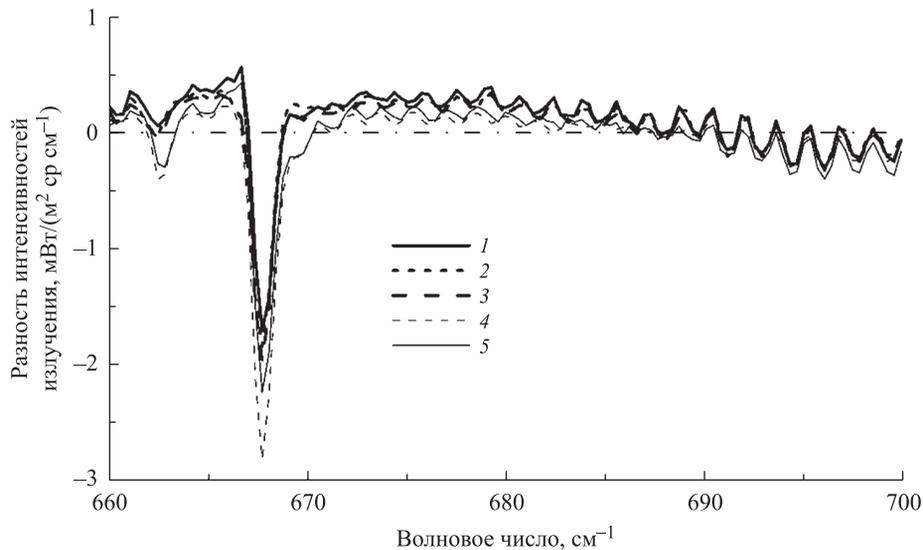


Рис. 2. Средние разности измеренных и рассчитанных спектров для трех ИК-зондировщиков и различных временных периодов в 2015 г. Область спектра для температурного зондирования стратосферы. Обозначения кривых: ИКФС-2, 5–6 февраля (1); 20–22 августа (5), IASI-A, 5–6 февраля (2); 20–22 августа (4), IASI-B, 5–6 февраля (3).

Оно показывает систематическое завышение расчетных значений по сравнению с измерениями, составляющее порядка $1.5 \text{ мВт/м}^2 \text{ ср см}^{-1}$. Подобное завышение характерно также для IASI-A и IASI-B.

Одной из возможных причин систематической ошибки является то, что в используемой радиационной модели атмосферы не учитывается аэрозольное ослабление излучения [14, 15]. Такой учет в настоящее время затруднителен в связи с отсутствием синхронных данных об ИК оптических

характеристиках аэрозолей в пунктах спутникового зондирования.

4. Как указывалось выше, важнейшее целевое применение данных ИК-зондировщика ИКФС-2 – дистанционное определение вертикальных профилей температуры. Для решения этой классической обратной задачи спутниковой метеорологии были созданы алгоритмы различного типа [15–18] и соответствующее программное обеспечение: алгоритмы множественной линейной регрессии,

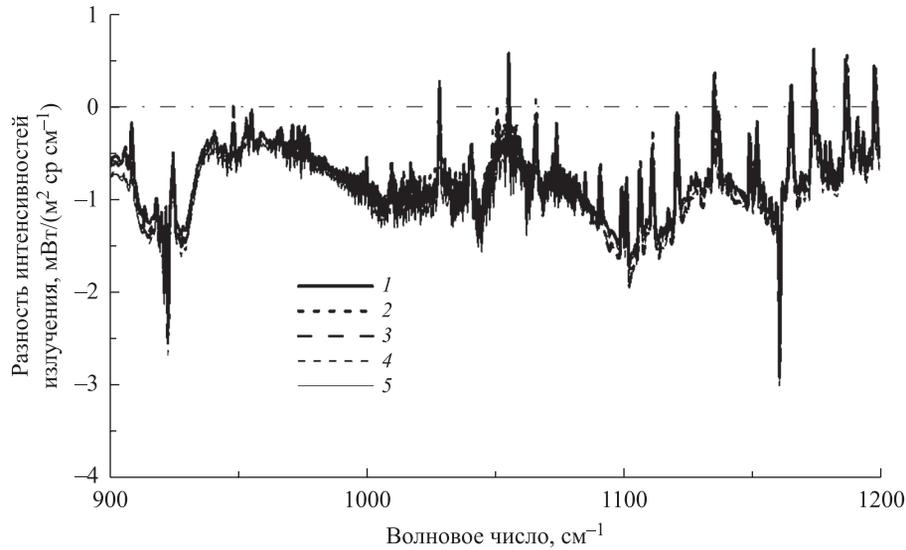


Рис. 3. Средние разности измеренных и рассчитанных спектров для трех ИК-зондировщиков и различных временных периодов в 2015 г. Спектральная область – окно прозрачности. Обозначения кривых: ИКФС-2, 5–6 февраля (1); 20–22 августа (5); IASI-A, 5–6 февраля (2); 20–22 августа (4); IASI-B, 5–6 февраля (3).

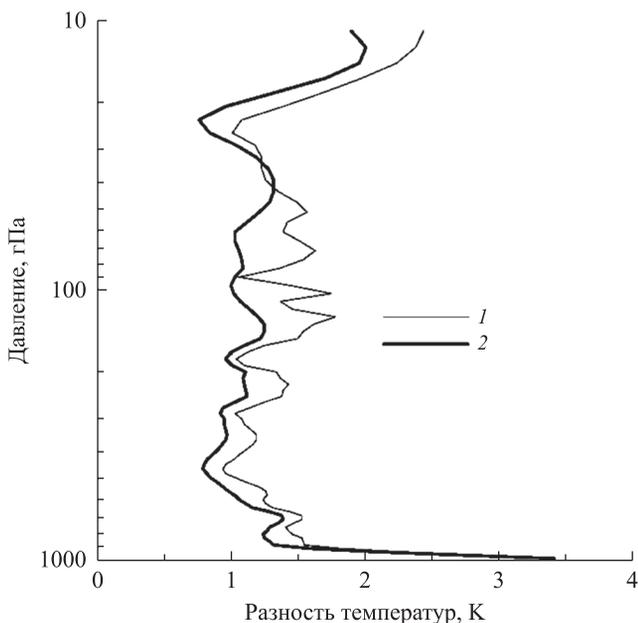


Рис. 4. Среднеквадратические разности восстановленных профилей температуры и данных анализа NCEP GFS. 17 октября 2015 г., непосредственное сравнение профилей двух типов исходных данных (1) и усредненные по вертикали с учетом усредняющих ядер (2).

искусственных нейронных сетей, а также физико-математический итерационный алгоритм на базе метода статистической регуляризации. Как правило, на первом этапе используются регрессионные алгоритмы; на втором этапе целесообразно применить итерационный алгоритм, если разница между измеренными и рассчитанными спектрами

излучения превышает заданный порог (критерий невязки).

Важно отметить, что эффективное применение перечисленных алгоритмов возможно только при решении двух вспомогательных задач – детектирования облачности в поле зрения прибора и коррекции систематических смещений между спутниковыми данными и результатами численного моделирования.

На рис. 4 представлен пример вертикального распределения погрешности восстановления профилей температуры по данным измерений ИКФС-2 в безоблачных условиях. Для анализа статистики погрешностей дистанционного зондирования использованы данные за 17 октября 2015 г. над водной поверхностью, идентифицированные как “безоблачные”. В качестве количественной меры погрешности принята среднеквадратическая разность между спутниковыми оценками и пространственно совмещенными синхронными данными 6-ти часового численного прогноза полей температуры, производимыми глобальной прогностической системой GFS NCEP. Эти данные считаются эталонными (референсными) и для сравнения со спутниковыми оценками температуры берутся двух видов – без усреднения по вертикали и с усреднением (для согласования вертикального разрешения восстановленных и референсных профилей). Согласно оценкам Гидрометцентра России среднеквадратичная погрешность указанных прогностических данных (при сравнении с данными радиозондирования) находится в диапазоне 0.6–1.4 °C для слоя 1000–40 гПа.

Из рис. 4 видно, что в большей части тропосферы (слой 1000–100 гПа) погрешности определения температуры составляют ~ 1К при согласовании вертикального разрешения спутниковых оценок и референсных данных (с учетом усредняющих ядер дистанционных спутниковых измерений). Заметное возрастание погрешности дистанционных измерений вблизи поверхности предположительно обусловлено неточным заданием излучательных способностей поверхности при решении обратной задачи и отмеченным выше систематическим завышением расчетных значений излучения по сравнению с измеренными, в окне прозрачности 8–12 мкм.

Оценку погрешностей результатов спутникового температурного зондирования можно также получать путем сравнения с ближайшими (по времени и месту) данными аэрологического зондирования. Подобные сравнения, выполненные для ограниченной по объему выборки пар “спутниковая оценка – радиозонд”, дают результаты, близкие к приведенным на рис. 4.

5. Основные результаты космического эксперимента и проведенных исследований можно суммировать следующим образом:

– созданный спутниковый ИК-зондирующий ИКФС–2 регистрирует спектры уходящего ИК-излучения системы атмосфера-поверхность с высокой радиометрической точностью, соответствующей современному мировому уровню;

– разработанные ИК радиационные модели (в том числе БРМ) адекватно описывают спектральные измерения ИКФС-2 в 15 мкм полосе поглощения CO₂, используемой для восстановления вертикальных профилей температуры атмосферы; в окне прозрачности 8–12 мкм наблюдаются систематические завышения расчетных величин, что, вероятно, обусловлено влиянием аэрозольной компоненты атмосферы, не учитываемой в радиационной модели атмосферы;

– интерпретация измеренных с помощью аппаратуры ИКФС-2 спектров уходящего излучения в условиях безоблачной атмосферы позволяет получать вертикальные профили температуры с погрешностями, близкими к 1К в большей части высотной области 0–30 км, за исключением нижней тропосферы и высот более 30 км, где эти погрешности близки к 2–3К.

Исследования, проведенные в СПбГУ, были частично профинансированы из гранта РНФ № 14–17–00096. В работе использовались данные спутника МЕТЕОСАТ-10 о маске облачности и данные измерений ИК-зондировщиков IASI-A и -B на спутниках МЕТОР -А и -В (открытый доступ на сайте <https://eportal.eumetsat.int/>). Также использовались данные глобальной прогностической системы NCEP GFS (открытый доступ на сайте <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaplan L. D.* Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements // *JOSA*. 1959. V.49. Issue. 10. P. 1004–1006, doi:10.1364/JOSA.49.001004.
2. *Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю. М.* Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 280 с.
3. *Wark D. Q., Hilleary D. T.* Atmospheric Temperature: Successful Test of Remote Probing // *Science*. 1969. V. 165. № 3899. P. 1256–1258.
4. *Hanel R., Conrath B.* Preliminary Results from the Interferometer Experiment on Nimbus III // *Science*. 1969. V.165. № 3899. P. 1258–1260.
5. *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.
6. *Бурцев А.И., Пахомов Л. А., Успенский А. Б., Ветлов И. П., Плохенко Ю. В., Соловьев В. И.* Температурное зондирование атмосферы с ИСЗ “Метеор-2” // *Метеорология и гидрология*. 1983. № 10. С. 11–20.
7. *Успенский А.Б., Рублев А. Н.* Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 6. С. 4–15.
8. *Асмус В.В., Загребяев 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. 5–15.
9. *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.
10. *Головин Ю.М., Завелевич Ф. С., Козлов Д. А., Козлов И. А., Монахов Д. О., Никулин А. Г., Ушаков Н. Н., Поляков А. В., Тимофеев Ю. М.* Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: летные испытания и первые измерения спектров атмосферы // *Космонавтика и ракетостроение*. 2015. № 6 (85), С. 51–58.
11. *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. № 9. P. 5563–5574.
12. *Поляков А.В., Тимофеев Ю. М., Виролайнен Я. А., Успенский А. Б., Завелевич Ф. С., Головин Ю. М., Козлов Д. А., Рублев А. Н., Кухарский А. В.* Спут-

- никовый атмосферный зондировщик ИКФС-2.
1. Анализ измерений спектров уходящего излучения // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 71–78.
 13. Рублев А.Н., Успенский А.Б., Пяткин В.П., Русин Е.В. Быстрая модель радиационного переноса для анализа данных гиперспектрального ИК-зондировщика спутников серии “Метеор-М” // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 16–24.
 14. Hollweg H.-D., Bakan S., Taylor J. P. Is the aerosol emission detectable in the thermal infrared? // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, D15202, doi:10.1029/2005JD006432.
 15. Nalli N. R. Barnet C. D., Gambacorta A., Maddy E. S., Maddy E. S., Xie H., King T. S., Joseph E., Morris V. R. On the angular effect of residual clouds and aerosols in clear-sky infrared window radiance observations. 2. Satellite experimental analyses, // J. Geophys. Res. 2013 V. 118. P. 1420–1435, doi:10.1029/2012JD018260.
 16. 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.
 17. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виrolainen Я.А. Применение искусственных нейронных сетей в температурно-влажностном зондировании атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т.50. № 3. С. 373–380.
 18. Polyakov A. V., Timofeyev Yu. M., Virolainen Ya. A. Comparison of different techniques in atmospheric temperature-humidity sensing from space // I. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. № 15. P. 5899–5912.

Atmospheric Temperature Sounding with Satellite Fourier-Spectrometer

© 2017 V. V. Asmus, Yu. M. Timofeyev, A. V. Polyakov*, A. B. Uspensky**, Yu. M. Golovin, F. S. Zavelevich, D. A. Kozlov, A. N. Rublev, A. V. Kukharsky, V. P. Pyatkin, E. V. Rusin

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

The initial assessment of radiance spectra measured by IR sounder IKFS-2 on-board “Meteor-M” N2 satellite demonstrate their high quality. It is also found that the fast radiative transfer model (developed for IKFS-2) provides ratherably accurate simulation of measured radiance spectra, especially for the channels in 15 μ m band used for atmospheric temperature profile retrievals. The accuracy of temperature profile retrievals is shown to be about 1K within the layer 0–30 km with the exception of the lower troposphere and the layer above 30 km where the errors are close to 2–3K.

Key words: remote sounding, atmospheric temperature, IR Fourier transform spectrometer IKFS-2, fast radiative transfer models.