
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**СПУТНИКОВОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
В ОБЛАЧНЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2012 г. А. В. Поляков*, Ю. М. Тимофеев, В. С. Косцов

Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет

*E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 21.10.2011 г.

На основе численных экспериментов по замкнутой схеме анализируются погрешности определения вертикальных профилей температуры в условиях облачной атмосферы с помощью российских приборов спутника “Метеор”: ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ и МСУ-МР. Показано, что погрешности спутникового зондирования в инфракрасном (ИК) диапазоне с помощью отдельно используемого прибора ИКФС-2 в условиях облачной атмосферы значительно возрастают в тропосфере и их средне-квадратичные величины могут достигать ~5 К и более. Погрешности при использовании прибора МТВЗА-ГЯ в тропосфере могут составлять 2.0–3.5 К независимо от наличия облачности. Совместное использование микроволновых (МКВ) измерений и 40 стратосферных каналов в ИК-области позволяет существенно повысить точности температурного зондирования только в стратосфере. Использование МКВ-измерений и квазиоптимального набора ИК-измерений (273 канала прибора ИКФС-2) позволяет определять вертикальный профиль температуры в большей части тропосферы с погрешностями 1–2 К при наличии облачности.

Ключевые слова: спутниковое комплексное ИК- и МКВ-зондирование атмосферы, ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ, МСУ-МР, численное моделирование, погрешности температурного зондирования, облачные условия

ВВЕДЕНИЕ

При решении классической задачи спутниковой метеорологии – определении вертикальных профилей температуры – используются одновременные измерения уходящего теплового излучения в полосах CO₂ и O₂ в инфракрасной (ИК) и микроволновой (МКВ) областях спектра (Кондратьев, Тимофеев, 1978). Подобная спутниковая система температурного зондирования создается в настоящее время в России на базе приборов ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ (Дядюченко и др., 2010) с привлечением данных о параметрах облачности оптического сканера малого разрешения МСУ-МР. Спутниковое температурное зондирование осуществляется в различных условиях облачного состояния атмосферы: в безоблачной, частично облачной и сплошной облачной ситуациях. В условиях сплошной облачности основная роль в решении задачи температурного зондирования тропосферы отводится, как правило, измерениям уходящего излучения в МКВ-области спектра. Эту роль в планируемой российской системе спутникового температурного зондирования атмосферы будет играть прибор МТВЗА-ГЯ. В условиях частичной облачности разработаны различные следующие подходы к использованию ИК-измерений уходящего излучения для температурного зондирования:

1) методики определения излучения безоблачной атмосферы на основе анализа последовательности кадров измерений (Chahine, 1974, 1977; Smith, 1968; Susskind et al., 2003, 2006). С учетом особенностей пространственного сканирования прибора ИКФС-2 этот подход неприменим, так как прибор не обеспечивает обязательного для этого сплошного покрытия области измерений;

2) определение различных параметров облаков из самих многоспектральных ИК-измерений или ИК- + МКВ-измерений (Menzel et al., 1983; Eyre, 1989; Li et al., 2005; Zhou et al., 2005; Zhou et al., 2007). При этом часто привлекаются данные одновременных измерений сканеров более высокого пространственного разрешения. Для спутника “Метеор” таким прибором будет сканер МСУ-МР, который может давать информацию о балльности и высоте облаков.

При втором подходе рассматриваются также возможности определения более детальных характеристик облаков, например, оптической толщины облаков и эффективных размеров облачных частиц из многоспектральных ИК-измерений (Liu et al., 2009).

В данной работе анализируются погрешности температурного зондирования в условиях облачной атмосферы при использовании различных наборов измерений на спутнике “Метеор”. Отме-

тим, что для измерений прибора ИКФС-2 в безоблачной атмосфере погрешности определения температуры и других параметров атмосферы и поверхности рассматривались в работах (Поляков и др., 2009, 2010а, 2010б).

ДЕТАЛИ РАСЧЕТОВ

Для численного анализа погрешностей температурного зондирования в облачных условиях необходимо располагать представительным ансамблем возможных значений физических параметров состояния облачной атмосферы и поверхности. При создании этого ансамбля нами использовался ансамбль данных вертикальных профилей температуры, влажности, отношения смеси озона (широко используемый за рубежом ансамбль TIGR), также использованный ранее в работах (Поляков и др., 2009, 2010а, 2010б) ансамбль для безоблачной атмосферы. За основу модели облачности была взята база данных, созданная на основе судовых аэрологических и гидрометеорологических измерений, а также измерений на островных станциях и использовавшаяся в исследованиях (Заболотских и др., 2000, 2007). Сформированная база данных облачной атмосферы для данного исследования содержит 2311 реализаций и включает:

- вертикальные профили температуры, К;
- профили отношения смеси водяного пара, г/г;
- профили отношения смеси озона, метана, закиси азота;
- температуру поверхности суши, град;
- профили водности облаков, г/м³;
- балльность облаков;
- скорость приводного ветра и соленость поверхностного слоя воды;
- излучательную способность поверхности суши (ИСПС) в ИК- и МКВ-диапазонах спектра.

Конкретные реализации ИСПС вычислялись по методике (Тимофеев, Мартынов, 1996) для ИК-диапазона и брались из банка данных AMSR-E Emissivity Database (<http://www.aer.com/scienceResearch/mwrs/emis.html>) для МКВ-диапазона.

Для излучательной способности водной поверхности (ИСВП) в ИК-области использовалась неизменная спектральная зависимость (Nalli, 2001). В МКВ-области ИСВП вычислялась из значений скорости ветра и солености воды. Балльность облаков разыгрывалась с применением программного генератора (датчика) случайных чисел как случайная величина, равномерно распределенная в интервале [0, 10].

Исследование погрешностей температурного зондирования осуществлялось на основе замкнутых численных экспериментов для большого числа реализаций состояния атмосферы и поверхно-

сти для различных широтных зон (по классификации ансамбля TIGR).

Расчет яркостной температуры уходящего МКВ-излучения осуществлялся с помощью известной интегральной формы уравнения переноса с учетом поглощения кислородом, водяным паром и жидкокапельной влагой облаков.

В ИК-области спектра использовалась простейшая модель облачной атмосферы, определяемая балльностью облаков и их высотой. Облака предполагались абсолютно черными излучателями. Верхние границы облаков находились в диапазоне высот 1–10 км, но большая часть их относилась к облакам нижнего яруса (верхние границы облаков 1–3 км), для которых приближение абсолютно черных излучателей выполняется с высокой точностью.

Излучение при наличии облаков в обеих областях спектра вычислялось по формуле

$$J^{\uparrow} = ((10 - N)J_{\text{BO}}^{\uparrow} + NJ_{\text{O}}^{\uparrow})/10,$$

где J_{BO}^{\uparrow} и J_{O}^{\uparrow} – уходящие излучения в безоблачной и облачной атмосфере, N – балльность облачности.

В численных экспериментах по замкнутой схеме решалась комплексная обратная задача по определению профилей температуры, влажности и малых газовых составляющих (МГС), водности облаков, температуры поверхности, ИСПС в ИК- и МКВ-областях спектра, а также (в случае водной поверхности) – скорости приводного ветра. Относительно солености задача оказалась малоинформативна, поэтому соленость не определялась.

Решение обратной задачи по определению указанных параметров осуществлялось с помощью метода множественной линейной регрессии. Использование этого метода для оценки погрешностей правомерно, так как применение дополнительных итераций на основе физико-математического подхода мало меняет результаты при определении профиля температуры (Успенский, 2003). Расчеты проводились для различных широтных зон и поверхностей, и при моделировании случайных погрешностей измерений уходящего излучения соответствующими приборам ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ. Далее анализировались среднеквадратические погрешности определения температуры в основном тропосфере, где наблюдается существенное влияние облаков, полученные на основе проведения численных экспериментов для большого числа (от нескольких сотен до тысячи) реализаций состояния атмосферы и поверхности для различных широтных зон. Проиллюстрируем полученные результаты для условий средних широт и наблюдений над водной поверхностью.

ПОГРЕШНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

При проведении численных экспериментов по температурному зондированию облачной атмосферы с помощью различных приборов и их комбинаций предполагалось, что сканер МСУ-МР позволяет получать оценки балльности облаков и их высот верхней границ с погрешностями 2 балла и 1 км соответственно.

Проанализируем погрешности температурного зондирования в облачной атмосфере с помощью приборов ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ.

Напомним, что прибор ИКФС-2 позволяет определять вертикальный профиль температуры с погрешностями, близкими к 1 К в широком диапазоне высот (за исключением нижней части тропосферы 0–2 км) при отсутствии облаков (Поляков и др., 2009). Уменьшение точности температурного зондирования в нижнем слое обусловлено влиянием на излучение не только температуры атмосферы в этом слое, но и температуры поверхности океанов и суши, а также излучательной способности. На рис. 1 кривые 1 и 2 демонстрируют погрешности определения температуры по измерениям ИКФС-2 при различной балльности облачности. Из сравнения кривых следует, что влияние облаков на ИК-температурное зондирование в слое 0–5 км значительно. Погрешности при большой балльности облачности (более 8) могут достигать в нижней тропосфере более 5 К. При малой балльности (менее 2) они близки к 3 К.

Расчеты уходящего МКВ-излучения показали, что влияние облаков на уходящее излучение, измеряемое прибором МТВЗА-ГЯ, существенно только в прозрачных каналах прибора. В окнах прозрачности и слабой линии водяного пара это влияние может достигать 40 К в терминах радиояркостной температуры, но оно очень мало в полосе поглощения кислорода (0.5 см), используемой для решения задачи температурного зондирования. Эта особенность формирования МКВ излучения наглядно проявляется на рис. 1, где кривые 3 и 4 показывают погрешности определения температуры при использовании измерений МКВ зондировщика для различных балльностей облаков (случай водной поверхности, средние широты). Из приведенного рисунка видно, что в нижней и средней тропосфере (0–8 км) влияние облаков на МКВ-температурное зондирование (прибор МТВЗА-ГЯ) относительно невелико (0.2–0.8 К). Но при этом сами погрешности достаточно значительны и составляют 2–3.4 К. Важно подчеркнуть, что один МКВ-прибор не позволяет достичь точности определения температуры в 1 К даже в безоблачной атмосфере.

Для более наглядного сопоставления возможностей спутниковых приборов в ИК- и МКВ-областях спектра сравним на рис. 1 кривые 1 и 3, кото-

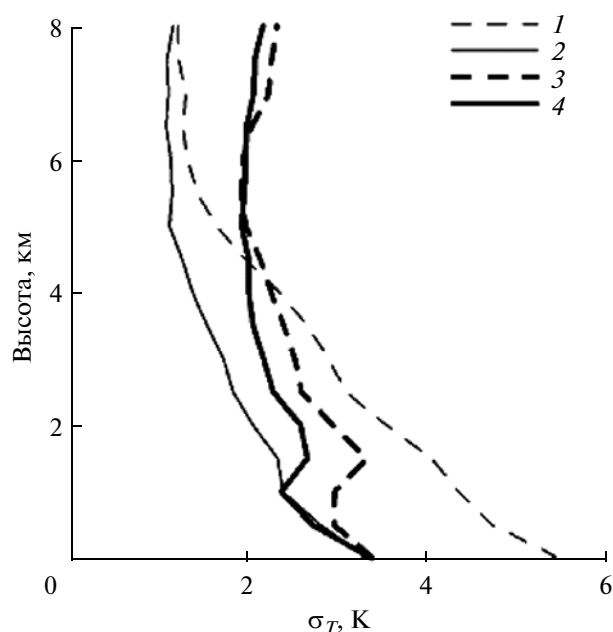


Рис. 1. Погрешности определения температуры σ_T при высоких $N > 8$ (1 и 3) низких $N < 2$ (2 и 4) балльностях облачности по данным ИК- (1 и 2) и МКВ- (3 и 4) измерений. Случай водной поверхности, средние широты.

рые показывают погрешности приборов ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ для средних широт над водной поверхностью для больших значений балльности облачности (≥ 8). Из рисунка видны значительные преимущества МКВ-измерений в слое 0–4 км по сравнению с ИК-измерениями. При этом одни МКВ-измерения при большой балльности облаков позволяют определять температуру в этом слое с погрешностями 2.3–3.4 К. Выше 4 км прибор ИКФС-2 начинает иметь преимущества — на высоте 8 км его погрешности приближаются к 1 К.

При анализе потенциальных погрешностей определения температуры с помощью использования совместных измерений в ИК- и МКВ-диапазонах спектра рассматривались два варианта:

1) использование МКВ-измерений и 40 каналов ИКФС-2, расположенных в полосе CO_2 при 15 мкм, формирование уходящего излучения в которых осуществляется в стратосфере и не подвержено влиянию облаков тропосферы;

2) использование МКВ-измерений и квазиоптимального набора ИК-измерений (специально отобранные 273 канала измерений в спектральной области 660–2000 cm^{-1}).

Сравнение погрешностей температурного зондирования в облачной атмосфере одним прибором МТВЗА-ГЯ и комбинацией измерений МТВЗА-ГЯ + 40 стратосферных каналов ИКФС показало следующее: в безоблачных условиях прибор ИКФС-2 в высотной области 0–20 км да-

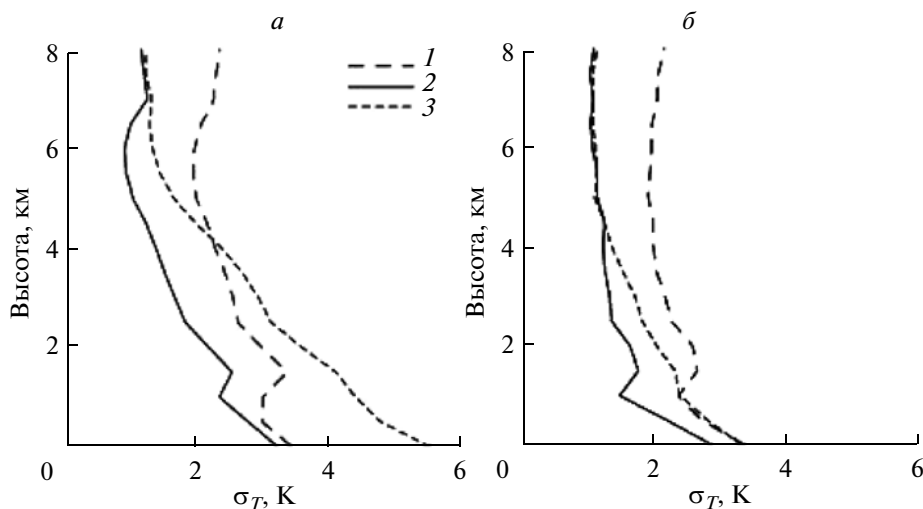


Рис. 2. Погрешности определения температуры σ_T : *a* – при высоких ($N > 8$) и *б* – при низких ($N < 2$) балльности облачности по данным МКВ (1), МКВ- + ИК- (2) и ИК-измерений (3). Случай водной поверхности, средние широты.

ет высокую точность 0.5–1 К (за исключением нижнего 1 км слоя). Одни МКВ-измерения позволяют получить погрешности в 1.5–2.8 К. Добавление 40 стратосферных ИК-каналов заметно влияет на погрешности только выше 10 км. Ниже 10 км погрешности определяются только МКВ-измерениями, что естественно, так как в этой схеме используются только стратосферные каналы ИКФС-2. Выше 13 км основную роль играют ИК-измерения, и погрешности определения температуры приближаются к 1 К, как и в безоблачном случае.

На рис. 2*a*, 2*б* сравниваются погрешности температурного зондирования атмосферы для различных значений балльности облачности при использовании только МКВ- или ИК-измерений и совместно МКВ- и ИК-измерений. В этом случае для ИК-области используется квазиоптимальный набор из 273 каналов для прибора ИКФС-2.

При большой балльности облаков (более 8, рис. 2*a*) совместное ИК- и МКВ-температурное зондирование позволяет получить в большей части тропосферы погрешности в 1–2 К. При этом уже на высоте 6 км и выше точность совместного зондирования приближается к 1 К. МКВ-температурное зондирование дает в тропосфере погрешности 2.2–3.3 К. ИК-измерения позволяют получать профиль температуры с большими погрешностями, чем МКВ-измерения ниже 4 км, причем у поверхности они могут достигать более 5 К.

Рисунок 2*a* показывает, что ИК-измерения, в случае использования большого числа каналов измерений, в том числе в оптически прозрачных спектральных интервалах, содержат определенную значимую информацию о температуре нижней тропосферы и в условиях облачной атмосфе-

ры. Привлечение этих измерений в алгоритме интерпретации повышает точность температурного зондирования на 0.5–1.0 К.

Рисунок 2*б* демонстрирует подобные же сравнения для ситуаций с малой (менее 2) балльностью облаков. Здесь погрешности температурного зондирования в среднем меньше, чем для большой балльности облаков. При малой балльности облаков совместное ИК- + МКВ-зондирование позволяет получать погрешности 1–2 К (за исключением первого километрового слоя, где погрешности близки к 3 К). Рост погрешностей в нижней тропосфере связан с тем, что на формирование излучения вблизи поверхности влияет еще и неопределенность ее температуры и излучательной способности. Сходное ухудшение наблюдается и в безоблачной атмосфере (Поляков и др., 2009).

Приведенный пример снова подтверждает важность включения в системы обработки спутниковых измерений ИК-каналов в прозрачных областях, “чувствующих облака”.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе численных экспериментов по моделированию спутникового температурного зондирования в облачной атмосфере с помощью приборов для измерений уходящего ИК- и МКВ-излучений (ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ) определены потенциальные погрешности при различном использовании измерений приборов. В численных экспериментах по замкнутой схеме решалась комплексная обратная задача по определению профилей температуры и влажности, водности облаков, температуры и излучательной способности поверхности и ряда других параметров.

Для проведения этих численных экспериментов был сформирован ансамбль состояний облачной атмосферы на основе базы данных TIGR и характеристик облаков, включающий балльности облаков и профиль водности. В исследованиях предполагалось наличие данных о балльности и высотах верхней границы облаков (по данным сканера МСУ-МР) с погрешностями 2 балла и 1 км соответственно.

Основные выводы исследований:

1) в облачной атмосфере погрешности ИК-температурного зондирования с помощью прибора ИКФС-2 значительно возрастают в тропосфере и их среднеквадратичные величины могут достигать ~5 К и более для большой балльности облаков;

2) погрешности МКВ-температурного зондирования в тропосфере могут составлять 2.0–3.5 К независимо от наличия облачности;

3) совместное использование МКВ-измерений и 40 стратосферных каналов в ИК-области позволяют существенно повысить точности температурного зондирования в стратосфере, однако в тропосфере погрешности заметно превышают 1 К;

4) использование МКВ измерений и квазиоптимального набора ИК-измерений (273 канала прибора ИКФС-2), а также данных о балльности облаков и их высоте из измерений сканера МСУ-МР позволяет определять вертикальный профиль температуры в большей части тропосферы с погрешностями 1–2 К даже при наличии облачности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 09-05-00797-а и грантов НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и № 11.37.28.204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дядюченко В.Н., Селин В.А., Шилов А.Е., Волков С.Н., Горбунов А.В., Макриденко Л.А., Трифонов Ю.В., Асмус В.В., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Шмельков К.И. Развитие космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения на базе системы полярно-орбитальных ИСЗ серии "Метеор-М" // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 13–19.
- Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М. Разработка и валидация алгоритмов восстановления скорости приводного ветра по данным SSM/I с применением Нейронных Сетей и физических ограничений // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 2. С. 62–71.
- Заболотских Е.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б., Митник Л.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М., Черный И.В. О точности микроволновых спутниковых измерений скорости приводного ветра, влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 5. № 38. С. 592–600.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 280 с.
- 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. 2010а. № 3. С. 3–11.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 4. С. 85–90.
- Тимофеев Ю.М., Мартынов А.А. Об определении температуры и излучательной способности поверхности суши // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 12–17.
- Успенский А.Б. Дистанционное зондирование атмосферы с помощью спутниковых Фурье спектрометров // Междунар. конф. Математические методы в геофизике / Под ред. Михайленко Б.Г. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ, 2003. Ч. II. С. 579–584.
- Chahine M.T. Remote sounding cloudy atmospheres. I. The Single Cloud Layer // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 233–243.
- Chahine M.T. Remote sounding cloudy atmospheres. II. Multiple Cloud Formations // J. Atmos. Sci. 1977. V. 34. P. 744–757.
- Eyre J.R. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal interpolation. I: Theory and simulation for TOVS // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 1989. V. 115. P. 1001–1026.
- Liu X., Zhou D.K., Larar A.M., Smith W.L., Schuessel P., Newman S.M., Taylor J.P., Wu W. Retrieval of atmospheric profiles and cloud properties from IASI spectra using superchannels // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 9121–9142.
- Menzel W., Smith T., Stewart T.R. Improved cloud motion vector and altitude assignment using VAS // J. Appl. Meteorol. 1983. V. 22. P. 377–384.
- Nalli N.R., Smith W.L., Huang B. Quasi-specular model for calculation the reflection of atmospheric-emitted infrared radiation from a rough water surface // Appl. Opt. 2001. V. 40. № 9. P. 1343–1353.
- Smith W.L. An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiometer measurements // Mon. Weather Rev. 1968. V. 96. P. 387–396.
- Susskind J., Barnet C.D., Blaisdell J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in presence of clouds // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. P. 390–409.
- Susskind J., Barnet C., Blaisdell J., Iredell L., Keita F., Kouvaris L., Molnar G., Chahine M. Accuracy of geophysical parameters derived from Atmospheric Infrared Sounder/Advanced Microwave Sounding Unit as a function of fractional cloud cover // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D09S17. doi:10.1029/2005JD006272.
- Zhou D.K., Smith W.L., Liu X., Larar A.M., Huang H.-L.A., Li J., McGill M.J., Mango S.A. Thermodynamic and cloud parameters retrieval using infrared spectral data // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L15805. doi:10.1029/2005GL023211.
- Zhou D.K., Smith W.L., Liu X., Larar A.M., Mango S.A., Huang H.-L. Physically retrieving cloud and thermodynamic parameters from ultraspectral IR measurements // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. P. 969–982.

Satellite Temperature Sounding of the Atmosphere under Cloudiness Conditions

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeyev, V. S. Kostsov

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

On the basis of closed-loop numerical experiments, errors of determining the vertical temperature profiles in a cloudy atmosphere with the help of Russian instruments (IKFS-2, MTVZA-GYa and MSU-MR) onboard the satellite "Meteor" were analyzed. It has been shown that errors of infrared sounding using only IKFS-2 instrument under cloudiness conditions significantly increase in the troposphere and the rms value can reach ~5 K and more. The errors in the troposphere, when using MTVZA-GYa device, can range 2.0–3.5 K independently of the presence of clouds. The combined use of measurements in microwave and in 40 stratospheric infrared channels can significantly improve the accuracy of the temperature sounding only in the stratosphere. The combined use of microwave measurements and quasi-optimal set (273 channels of IKFS-2 device) of infrared measurements gives a possibility to determine the vertical temperature profile in most of the troposphere with errors of 1–2 K under cloudiness conditions.

Keywords: combined satellite infrared and microwave sounding, atmosphere, IKFS-2, MTVZA-GY, MSU-MR, numerical simulation, errors of the temperature sounding, cloudiness conditions