
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

УДК 551.508.953:551.510

**ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ИК-ЗОНДИРОВЩИКА ВЫСОКОГО
СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ИКФС-2**

© 2009 г. А. В. Поляков^{1*}, Ю. М. Тимофеев¹, А. Б. Успенский²

¹Санкт-Петербургский государственный университет

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

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

Поступила в редакцию 24.03.2009 г.

На основе созданной радиационной модели атмосферы в инфракрасной (ИК) области спектра, сформированного представительного ансамбля профилей температуры и влажности, численных экспериментов с использованием метода множественной линейной регрессии изучены потенциальные погрешности восстановления профилей температуры и влажности с помощью спутниковой аппаратуры ИКФС-2, запланированной к запуску на КА “Метеор-М” № 2. Измерения спектров уходящего теплового излучения прибором ИКФС-2 позволяют существенно уменьшить неопределенности в профиле температуры, от величин порядка 10 К до величин ~1 К в высотном диапазоне 0–50 км.

Ключевые слова: модель атмосферы, инфракрасный, влажность, температура, профиль влажности, множественная регрессия, спектральное разрешение.

ВВЕДЕНИЕ

Получение данных температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) из космоса является классической задачей спутниковой метеорологии. Первые эксперименты в этой области и начальные этапы развития дистанционных методов ТВЗА отражены в монографиях (Кондратьев, Тимофеев, 1970; Кондратьев, Тимофеев, 1978). Несмотря на почти 40-летний период работ в этой области и многочисленные спутниковые эксперименты, до сих пор нельзя утверждать, что с помощью спутникового метода удастся определить данные ТВЗА с необходимыми характеристиками (точность, вертикальное и пространственное разрешение и т.д.) в оперативном режиме при всех состояниях атмосферы. Дело в том, что на указанные характеристики влияют многие факторы: параметры приборов, состояние атмосферы (в частности, наличие облачности), адекватность радиационных моделей атмосферы и используемой априорной информации, а также особенности формирования уходящего теплового излучения атмосферы.

Исследования последних лет показали, что реализовать требования к результатам ТВЗА, прежде всего к точности и вертикальному разрешению, согласованные ВМО (см. ВМО, 2007), можно путем существенного повышения спектрального разрешения измерений излучения при сохранении их высокой точности. Правильность указанного

пути развития дистанционного спутникового метода подтверждается успехом проведенных в последние годы спутниковых экспериментов с аппаратурой AIRS/EOS Aqua и IASI/MetOp (Aumann et al., 1994; Aires et al., 2002; Успенский, 2003).

Подробный анализ современного состояния проблемы и перспектив развития данного направления спутникового зондирования дан А.Б. Успенским и др. в работах (Успенский, 2003; Успенский и др., 2005). В настоящее время в России осуществляется новый этап реализации температурно-влажностного зондирования, основанный на создании ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения бортовых инфракрасных (ИК) Фурье-спектрометров (ФС). Настоящий цикл статей посвящен количественному анализу возможностей ФС ИКФС-2, разработанного специалистами Центра Келдыша и подготавливаемого к запуску на КА “Метеор-М” № 2 для комплексного зондирования атмосферы и поверхности (Завелевич Ф.С. и др., 2006; Завелевич и др., 2008). Основные характеристики ФС – ИКФС-2 и IASI – близки, хотя IASI имеет более широкую спектральную область измерений и более высокое пространственное разрешение.

В настоящей статье анализируются возможности температурно-влажностного зондирования атмосферы с помощью аппаратуры ИКФС-2. В последующих статьях будут рассмотрены возможности определения по данным ИКФС-2 темпера-

Широтные зоны в банке данных TIGR

№	Название	Примечание
1	Тропическая (tropical)	–
2	Средние широты 1 (midlat1)	Умеренная зона
3	Средние широты 2 (midlat2)	Холодная умеренная и летняя полярная зоны
4	Полярная 1 (polar1)	Очень холодная полярная в Северном полушарии
5	Полярная 2 (polar2)	Зимняя полярная зона

туры и излучательной способности поверхности суши, а также оценивания содержания озона и малых газовых составляющих атмосферы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для исследований возможностей аппаратуры, разработок и тестирования алгоритмов интерпретации измерений уходящего излучения необходимо располагать численной моделью формирования уходящего теплового излучения. Такая радиационная модель и соответствующий программный комплекс (“радиационный код”) позволяют решать прямую задачу, т.е. вычислять спектры уходящего излучения, а также производные интенсивности излучения по различным параметрам атмосферы и поверхности для заданных моделей атмосферы и поверхности (необходимые при реализации физико-математического подхода к решению обратной задачи). Такая модель и радиационный код были созданы на основе современных данных о параметрах тонкой структуры полос поглощения (Rothman et al., 2005), модели континуального поглощения атмосферными газами СКД 2.4 (Clough et al., 1989) и прямого метода расчета (line-by-line) (Виролайнен, Поляков, 1999). Сравнения расчетов с измерениями уходящего излучения интерферометром IASI (у авторов статьи имелся только один случай совместных измерений IASI и параметров атмосферы) показали расхождение между измерениями и расчетами в пределах 0.5–4.0 К (в терминах яркостной температуры излучения) в различных областях спектра. Эти отличия, по нашему мнению, обусловлены в основном неполнотой полученной информации о состоянии атмосферы, а также погрешностями в задании количественных характеристик молекулярного поглощения. С другой стороны, эти сопоставления показали принципиальную пригодность использования разработанной радиационной модели для моделирования измерений прибором ИКФС-2.

Регистрируемый прибором сигнал представляет собой величины потока энергии в разрешаемых

спектральных интервалах. Для его моделирования необходимо выполнить расчеты монохроматического излучения с последующим интегрированием по спектральной переменной с учетом аппаратной функции прибора. Уходящее в зенит монохроматическое излучение земной атмосферы может быть описано (Тимофеев, Васильев, 2003) выражением (1)

$$J^{out}(\nu) = \varepsilon(\nu)B(\nu, T_s)P(\nu, 0, p_0) + \int_{p_0}^0 B(\nu, T(p)) \frac{dP(\nu, 0, p)}{dp} dp + (1 - \varepsilon(\nu))P(\nu, 0, p_0) \int_0^{p_0} B(\nu, T(p)) \frac{dP(\nu, p, p_0)}{dp} dp, \quad (1)$$

где $\varepsilon(\nu)$ – излучательная способность поверхности при волновом числе ν ; $B(\nu, T)$ – функция Планка при температуре T ; $P(\nu, p_1, p_2)$ – функция пропускания атмосферы между уровнями с давлениями p_1 и p_2 . Уходящее излучение J^{out} включает три компоненты, соответствующие слагаемым в выражении (1): излучение поверхности, восходящее излучение атмосферы и отраженное поверхностью нисходящее излучение атмосферы.

Существенную роль при разработке, отладке и тестировании систем интерпретации дистанционных измерений играет выбор набора модельных состояний атмосферы, называемого также статистической моделью ее состояния. Особенно важны свойства этого набора при построении регрессионного решающего оператора обратной задачи дистанционного зондирования. Задача создания репрезентативного ансамбля параметров состояния атмосферы и характеристик зондируемой поверхности формулировалась следующим образом: построить наборы характеристик поверхности и вертикальных профилей параметров атмосферы (в высотном диапазоне 0–80 км), адекватно описывающих наблюдаемые вариации этих параметров в глобальном и региональном масштабе. За основу ансамблей состояний атмосферы был взят банк данных TIGR, который содержит вертикальные профили температуры, содержания водяного пара и озона до высоты около 72 км (TIGR, 1995). В таблице приведены зоны, для которых имеются данные в ансамбле TIGR.

Для обращения результатов измерений ИКФС-2, т.е. численного решения обратной задачи, в настоящей работе используется метод множественной линейной регрессии. В дальнейшем, как это рекомендуется в ряде работ (см., например, (Успенский, 2003)), для уточнения результатов ТВЗА на втором этапе тематической обработки предполагается применить алгоритм метода статистической регуляризации (или его

модификации), причем будут использованы данные ИКФС-2 в заранее отобранном подмножестве наиболее информативных каналов.

Введем следующие обозначения: пусть φ – вектор искоемых переменных, в котором объединены все определяемые при решении обратной задачи величины, а именно, профили температуры и отношения смеси водяного пара, температура поверхности и коэффициенты разложения по эмпирическому ортогональному базису (ЭОФ) функции спектрального хода отражательной способности поверхности, а также профиль отношения смеси озона и общие содержания метана и двуокиси азота. Обозначим через f вектор измерений (измеренные прибором величины) – интенсивности излучения на сетке волновых чисел. Кроссквариационную матрицу этих векторов будем обозначать $K_{\varphi f}$, а ковариационную матрицу измерений, включающую также погрешности измерений, – K_f . Тогда выражение для матрицы решающего оператора R можно записать в виде

$$R = K_{\varphi f} K_f^{-1}, \quad (2)$$

а оценка решения $\tilde{\varphi}$ дается выражением

$$\tilde{\varphi} = \bar{\varphi} + R(f - \bar{f}), \quad (3)$$

где $\bar{\varphi}$ и \bar{f} – средние значения векторов искоемых и измеренных величин. На основе описанной выше статистической модели состояний атмосферы и рассчитанных спектров излучения были построены выборки пар $\{\varphi, f\}$. Для численной оценки погрешности метода может быть использована остаточная ковариационная матрица \tilde{D} , которая вычисляется по формуле

$$\tilde{D} = RK_f R' - RK_{f\varphi} - K_{f\varphi} R' + K_{\varphi}, \quad (4)$$

где K_{φ} – ковариационная матрица вектора искоемых параметров. Более универсальный подход основан на численном решении обратной задачи (в нашем случае – построении регрессионной оценки) в рамках замкнутого численного эксперимента с последующим сравнением полученных оценок и точного значения искоемых величин. Построив регрессионный оператор (2), мы выполнили с учетом моделирования шума измерений прибора ИКФС-2 замкнутый численный эксперимент на той же выборке. Погрешности решения обратной задачи, полученные с разделением выборки на обучающую и контрольную, и с использованием одной и той же выборки для построения решающего оператора и для моделирования дистанционных измерений, практически полностью совпадают, что говорит об однородности используемых выборок.

Для моделирования потенциальных возможностей прибора ИКФС-2 необходимо задать ко-

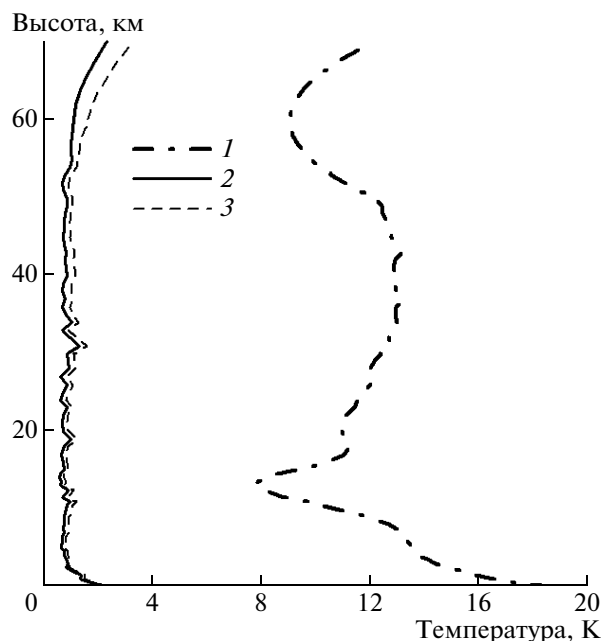


Рис. 1. Априорная изменчивость и значения среднеквадратической погрешности восстановления профиля температуры для глобального ансамбля: 1 – априорная изменчивость; 2 – погрешность восстановления температуры при погрешности измерения излучения I; 3 – погрешность восстановления температуры при погрешности измерения излучения 2. Решающий оператор построен на полной выборке TIGR (2311 состояний атмосферы), тестовая выборка – полная выборка TIGR (2311 состояний атмосферы).

вариационные матрицы ошибок измерений уходящего излучения. В данной работе использованы оценки погрешностей в соответствии с (Завелевич и др., 2008). Абсолютные погрешности на трех длинах волн имеют следующие значения: 6 мкм – 3×10^{-4} , 13 мкм – 1×10^{-4} и 15 мкм – 1×10^{-4} Вт/м²/ср/см⁻¹. При этом относительная погрешность колеблется от 0.2 до 30% в зависимости от спектральной области измерений (погрешность 1). Для оценки влияния величины измерительной ошибки на точность восстановления параметров атмосферы была также использована увеличенная в 1.5–3 раза погрешность (погрешность 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В схеме замкнутых численных экспериментов для восстановления зондируемых параметров был использован весь измеряемый ИКФС-2 спектр – 5400 спектральных каналов в спектральной области 660–2000 см⁻¹.

На рис. 1 приведены графики вертикального хода значений среднеквадратичной ошибки

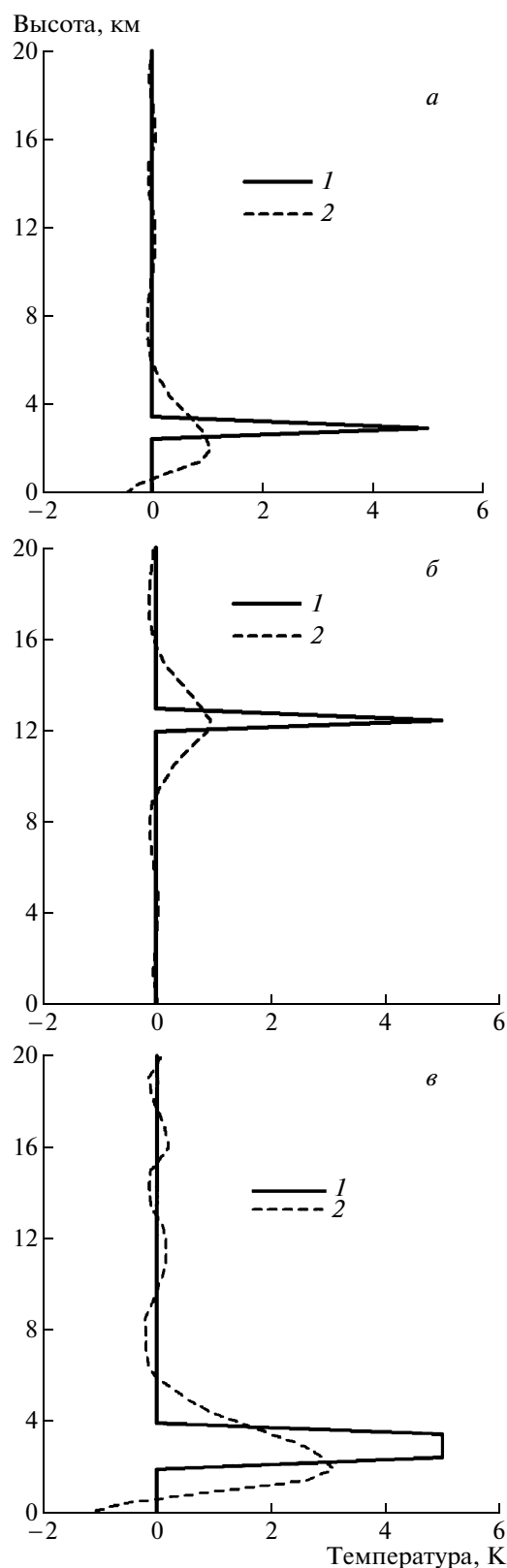


Рис. 2. Примеры восстановления возмущения профиля температуры с игольчатой вариацией δT : *a* – $\delta T = 5$ К на высоте 3 км; *б* – $\delta T = 5$ К на высоте 12.5 км; *в* – $\delta T = 5$ К на высотах 2.5–3.5 км. Профиль 873 из банка TIGR (из выборки средние широты, 1). 1 – исходные вариации; 2 – восстановленные вариации.

(СКО) восстановления температуры и, для сравнения, априорной неопределенности $T(p)$. Все оценки получены на полной (глобальной) выборке из банка данных TIGR (2311 реализаций). Из рис. 1 видно, в первую очередь, существенное уменьшение априорной неопределенности профилей температуры (от величин порядка 10 К до 1 К) в высотном диапазоне 0–50 км. Из рис. 1 также следует, что погрешность измерений излучения мало влияет на СКО на высотах менее 30 км при использовании измерений во всех каналах прибора. Анализ оценок погрешностей для различных зон, а также для разных решающих операторов (глобального и локальных, т.е. построенных для конкретных подвыборок) позволяет сделать следующие выводы:

1. На высотах 1–45 км погрешность восстановления $T(p)$ находится в диапазоне 0.5–2.0 К в зависимости от высоты, погрешности измерения излучения и используемого решающего оператора.

2. Наблюдается рост погрешности определения $T(p)$ в приземном слое (при некоторых условиях до 2.5 К) для всех моделей атмосферы и на высотах 30–35 км до 2–2.5 К для среднеширотных и полярных моделей атмосферы.

3. Использование локализованных решающих операторов позволяет уменьшить погрешности на 0.2–0.5 К, по сравнению с использованием единого (глобального) решающего оператора, для всех широтных поясов. В целом использование локализованных решающих операторов при меньшей погрешности измерения излучения дает возможность получать значения температуры с погрешностью 0.5–1.0 К с отдельными выбросами на некоторых высотах до 1.5 К в диапазоне высот 2–12 км и с погрешностью 0.5–1.5 К на высотах до 30 км.

4. Наблюдаются широтные вариации погрешностей в пределах 0.5–1.0 К. Минимальные погрешности, как правило (но не на всех высотах), наблюдаются для тропиков, а максимальные – для полярного подансамбля 2. Этот эффект обусловлен вариациями априорной неопределенности в задании температуры в различных подансамблях.

Важным требованием к спутниковому температурному зондированию является необходимость достижения вертикального разрешения в 1 км в тропосфере и ~2 км в стратосфере (ВМО, 2007). Анализ вертикального разрешения предлагаемого дистанционного метода был осуществлен с помощью восстановлений различных локальных, относительно узких по высоте, возмущений температуры на различных уровнях (см. рис. 2*a*, *б*, *в*). Численные эксперименты проводились при этом на сетке по высоте в 0.5 км. Возмущения температуры с амплитудой 5 К и полушириной в 0.5 км на высотах 3 км и 12.5 км определялись с погрешно-

стью ~ 4 К, а полуширина восстановленного возмущения составляла ~ 3 км. Менее локальное возмущение температуры на высоте 3 км с полушириной 1.5 км восстанавливалось с погрешностью ~ 2 К и полушириной ~ 3 км.

На основании описанных экспериментов можно предварительно оценить вертикальное разрешение рассматриваемого дистанционного метода в тропосфере величиной порядка 2–3 км. Это обусловлено достаточно значительной протяженностью по вертикали областей генерации теплового излучения в различных спектральных каналах измерений, а также тем, что использованный метод регрессии, автоматически учитывающий статистические характеристики исходной выборки, может существенно сглаживать профили, не принадлежащие к этой выборке. Примерно к таким же оценкам вертикального разрешения пришли авторы работы (Worden et al., 2004), анализирувавшие возможности спутникового интерферометра TES (спектральное разрешение измерений 0.1 см^{-1}).

В заключение данного раздела следует упомянуть о численных экспериментах по испытанию регрессионных процедур обращения моделированных данных IASI, выполненных в работах (Trotsenko et al., 2003; Успенский и др., 2005). Несмотря на ряд различий в регрессионном методе (применялась так называемая “регрессия на главные компоненты”, т.е. профили $T(p)$ представлялись в виде разложений по базису ЭОФ, см. (Успенский и др., 2003)), составе измерений (использовались данные в подмножестве 73 специально отобранных каналов) и использованных атмосферных моделях, статистика ошибок восстановления $T(p)$ оказалась близкой к приведенной выше. А именно – величины СКО результатов зондирования составляют 1.2–2.0, 1.0–1.2, 1.2–2.0 К в слоях 0–2, 2–12, 12–30 км соответственно. Отметим, что некоторое повышение точности и вертикального разрешения зондирований в тропосфере можно ожидать за счет “удачного” подбора базиса ЭОФ (репрезентативного для данного состояния атмосферы, с более детальным вертикальным разрешением).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ

Как известно, для описания вертикального распределения водяного пара в атмосфере используются различные физические величины. В данной работе количество водяного пара в атмосфере определялось в терминах массового отношения смеси и относительной влажности (в %). На рис. 3 представлен вертикальный ход СКО определения профиля отношения смеси водяного пара (для всех 3211 моделей атмосферы и для двух случаев погрешности измерений излучения),

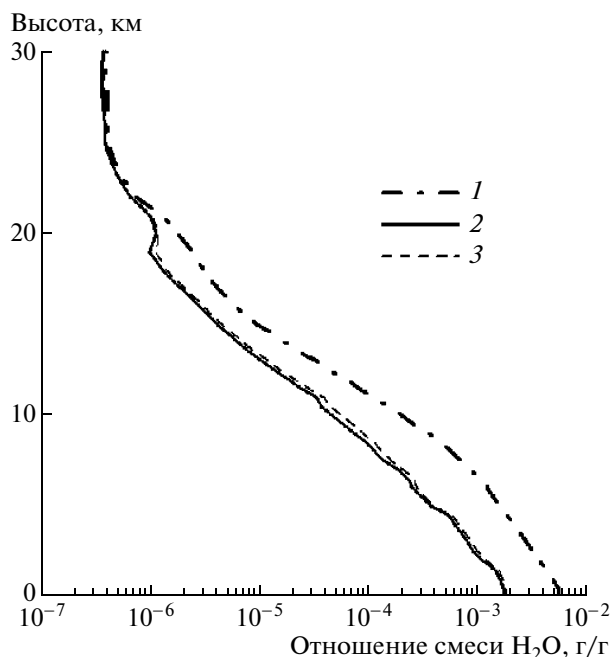


Рис. 3. Априорная изменчивость (1) и оценки погрешности восстановления профиля отношения смеси водяного пара при погрешностях измерения излучения 1 (2) и 2 (3). Оператор построен на полной выборке TIGR (2311 состояний атмосферы), тестовая выборка – полная выборка TIGR (2311 состояний атмосферы).

а также априорной изменчивости. Из него видны также заметное (в 3–4 раза) уменьшение априорной неопределенности на высотах 0–20 км и близость в масштабе рисунка оценок погрешностей для двух видов погрешности измерений излучения. Для оценки информативности рассматриваемого дистанционного метода на рис. 4а и б изображены кривые отношения апостериорной и априорной неопределенностей, иными словами, – погрешности зондирования и естественной изменчивости отношения смеси водяного пара для всех 2311 состояний атмосферы (а) и для тропической подвыборки (б). Оценки информативности спутникового эксперимента находятся в диапазоне 0.2–0.5 для слоя 0–20 км, т.е. априорная неопределенность уменьшается на различных уровнях в 2–5 раз.

Проведенные численные исследования показали, что при восстановлении отношения смеси целесообразно в большинстве случаев использовать локальные обратные операторы, что обусловлено сильной изменчивостью отношений смеси и их вариаций для различных подансамблей. При использовании локальных решающих операторов для всех широтных поясов наблюдается существенное уменьшение априорной изменчивости. Она уменьшается в 2–4 раза вблизи поверхности в слое ниже 2–3 км (максимально –

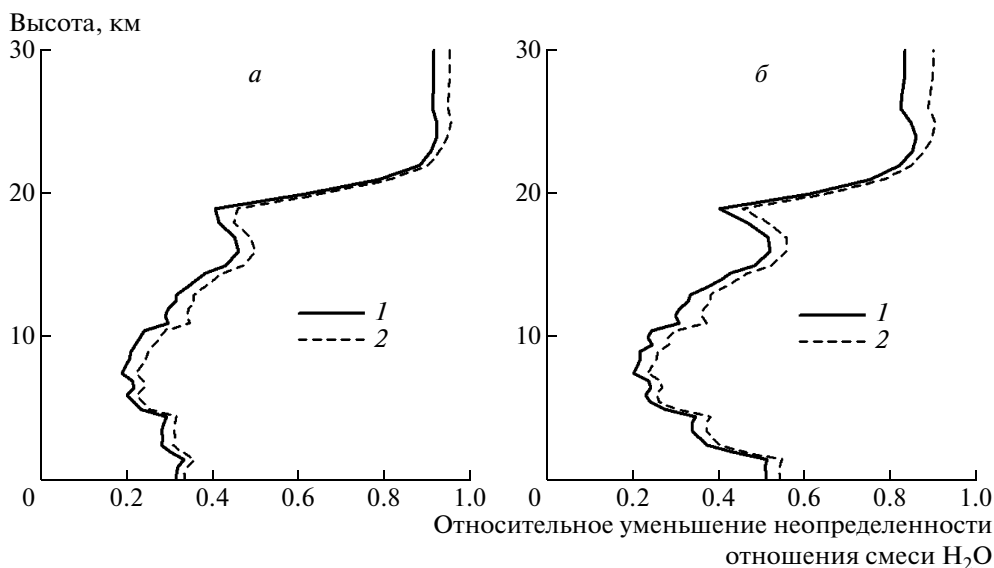


Рис. 4. Относительное уменьшение неопределенности (отношение: погрешность/априорная изменчивость) профиля отношения смеси водяного пара: 1 – при погрешности измерения излучения 1, 2 – при погрешности измерения излучения 2; а – оператор построен на полной выборке TIGR (2311 состояний атмосферы), тестовая выборка – полная выборка TIGR (2311 состояний атмосферы); б – оператор построен на тропическом подмножестве выборки TIGR (состояния атмосферы 1–872), тестовая выборка – тропическое подмножество выборки TIGR (состояния атмосферы 1–872).

в 4 раза – для выборки “полярная 1”, минимально – в 2 раза – для тропической выборки). На высотах 5–10 км уменьшение неопределенности отношения смеси водяного пара относительно априорной составляет от 2–2.5 раз для полярных и среднеширотной выборки и до 5 раз для тропической атмосферы.

Для ряда приложений, наряду с профилями отношения смеси водяного пара, представляют интерес профили относительной влажности. Относительная влажность, в отличие от отношения смеси водяного пара, не является независимым параметром, влияющим на излучение, а представляет собой комбинацию двух параметров, один из которых – температура. Регрессионный подход, принятый в настоящей работе, позволяет строить решающий оператор для любых функций, в том числе для профилей относительной влажности. Отметим, что, казалось бы, очевидный подход (использовать величины восстановленного отношения смеси водяного пара для пересчета их в относительную влажность) не позволяет получить оценки профиля относительной влажности с удовлетворительной точностью, так как алгоритм регрессии оптимизирован относительно определяемого параметра (в данном случае – именно отношения смеси, а не производных от него величин). Как показали численные эксперименты, при таком подходе погрешности восстановления относительной влажности находятся на уровне (или даже превосходит) априорную изменчивость.

На рис. 5 приведены профили оценок погрешностей восстановления относительной влажности и априорной изменчивости той же величины для полного глобального ансамбля. Из него видно, что погрешность восстановления относительной влажности составляет около 10–15 % (на глобальном статистическом ансамбле). Максимальный информационный вклад измерений уходящего ИК-излучения прибором ИКФС-2 соответствует высотам 13–17 км. На этих высотах априорная изменчивость уменьшается в 4–5 раз. В нижних слоях атмосферы (0–3 км) такое уменьшение существенно меньше, что обусловлено, как минимум, двумя причинами:

- малой информативностью измерений ИК уходящего излучения относительно содержания поглощающих компонент вблизи земной поверхности (при излучательной способности не сильно отличающейся от 1);

- относительно малыми априорными вариациями относительной влажности вблизи поверхности для рассматриваемого ансамбля состояний атмосферы.

Численный анализ погрешностей восстановления относительной влажности для разных подансамблей показал, что для нее, так же как ранее для отношения смеси, предпочтительно использование локальных, а не глобального, обратных операторов. Тем не менее, для относительной влажности ухудшение при использовании глобального обратного оператора вместо локальных не столь существенно, как при восстановлении

отношения смеси. Так, в полярных широтах его использование дает погрешности на 10% большие, чем при использовании локального оператора, а в средних – приблизительно на 5%.

Анализ показал, что ниже 10 км все подвыборки, за исключением полярной 1, дают близкие результаты. Эта подвыборка характеризуется наиболее теплой тропопаузой, а отношение смеси в ней минимально. Выше 10–12 км информативность дистанционных измерений снижается, и различия в погрешностях также обусловлены, в первую очередь, различиями в априорной изменчивости профилей относительной влажности.

В целом можно заключить, что в диапазоне высот 0.5–10 км значения относительной влажности могут определяться с погрешностью не хуже 15%, а на высотах 4–6 км – 10%. В приземном слое погрешность возрастает до 30%, что вызвано отмеченными выше особенностями формирования уходящего теплового ИК-излучения. Отметим, что указанные оценки погрешности близки к полученным в цитированных выше работах (Успенский и др., 2005; Trotsenko et al., 2003).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Рассмотрены потенциальные возможности спутниковой аппаратуры ИКФС-2, предназначенной для комплексного зондирования атмосферы и поверхности и запланированной к запуску на КА “Метеор-М” № 2. На основе созданной радиационной модели атмосферы в ИК-области спектра, сформированного представительного ансамбля профилей температуры и влажности, численных экспериментов с использованием метода множественной линейной регрессии изучены потенциальные погрешности восстановления профилей температуры и влажности. Они приведены ниже.

1. Измерения уходящего теплового излучения прибором ИКФС-2 позволяют существенно уменьшить неопределенности в профиле температуры – от величин порядка 10 К до величин ~1 К в высотном диапазоне 0–50 км.

2. Наблюдается рост погрешности определения температуры в приземном слое атмосферы (при некоторых условиях до 2.5 К) для всех моделей атмосферы и на высотах 30–35 км до 2–2.5 К для среднеширотных и полярных моделей атмосферы. Использование локализованных решающих операторов при меньшей погрешности измерения излучения позволяет определять температуру с погрешностью 0.5–1.0 К с отдельными выбросами на некоторых высотах до 1.5 К в диапазоне высот 2–12 км и с погрешностью 0.5–1.5 К на высотах до 30 км.

3. Наблюдаются широтные вариации погрешностей восстановления температуры в пределах 0.5–1.0 К. Минимальные погрешности, как правило (но не на всех высотах), имеют место для

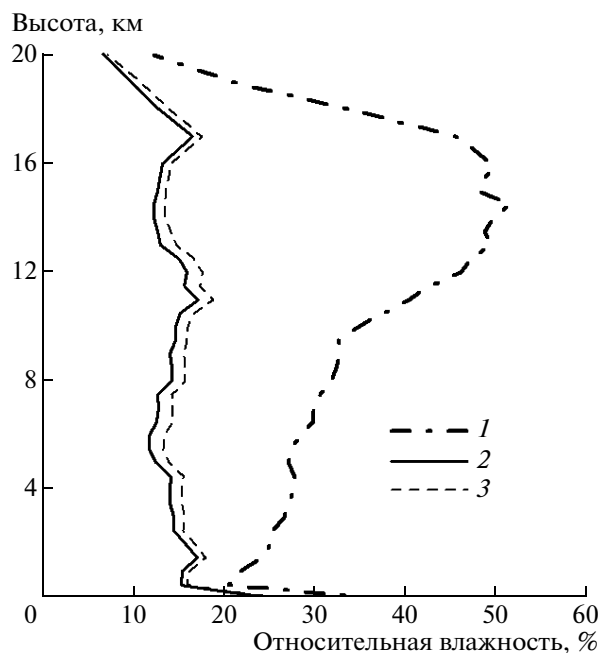


Рис. 5. Априорная изменчивость и оценки погрешности восстановления профиля относительной влажности: 1 – априорная изменчивость (СКО), 2 – погрешность при погрешности измерения излучения “по ТЗ”, 3 – погрешность при “реальной” погрешности измерения излучения: оператор построен на полной выборке TIGR (2311 состояний атмосферы), тестовая выборка – полная выборка TIGR (2311 состояний атмосферы).

тропиков, а максимальные – для полярного подансамбля 2.

4. Вертикальное разрешение предложенного спутникового метода определения профиля температуры с помощью аппаратуры ИКФС-2 составляет 2–3 км в тропосфере.

5. Априорная неопределенность отношения смеси водяного пара уменьшается в 2–5 раз на высотах 0–20 км. При использовании локальных решающих операторов для всех широтных поясов наблюдается существенное уменьшение априорной изменчивости. Она уменьшается в 2–4 раза вблизи поверхности в слое ниже 2–3 км (максимально – в 4 раза для выборки полярная 1, минимально – в 2 раза для тропической выборки). На высотах 5–10 км уменьшение неопределенности отношения смеси водяного пара относительно априорной составляет от 2–2.5 раза для полярных и среднеширотной выборки, до 5 раз для тропической атмосферы.

6. В диапазоне высот 0.5–20 км относительная влажность может определяться с погрешностью не хуже 15%, а на высотах 4–6 км – 10%. В приземном слое погрешность возрастает до 30%, что вызвано особенностями формирования уходящего теплового ИК-излучения.

В заключение отметим, что сравнения полученных оценок погрешностей определения тем-

пературы и влажности атмосферы с требованиями, сформулированными рабочими группами ВМО, показывают, что в большинстве случаев (на различных высотах атмосферы и при использовании в различных задачах) прибор ИКФС-2 может соответствовать так называемым предельным требованиям. Оптимальные требования (например, по температуре – 0.5–1.0 К, по влажности – 5%) с помощью прибора ИКФС-2 реализовать при использовании множественной линейной регрессии в большинстве случаев не удастся. Аналогичный вывод можно сделать и относительно вертикального разрешения получаемых параметров атмосферы. Определенные возможности повышения качества спутникового зондирования прибором ИКФС-2 связаны с использованием второго этапа оперативной обработки измерений – применением физико-математического подхода при обращении данных измерений. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НИЦ “ПЛАНЕТА” и грантов Рособразования №101138 и 393846 и РФФИ 09-05-00797-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виротайнен Я.А., Поляков А.В.* Алгоритм прямого расчета функций пропускания в задачах наземного дистанционного зондирования атмосферы // Вестн. СПбГУ. 1999. Сер. 4. Вып. 1. № 4. С. 25–31.
ВМО сайт, <http://www.wmo.ch> Требования к метеорологическим измерениям.
- Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. и др.* Дистанционное зондирование Земли с помощью ИК Фурье-спектрометра // Междунар. симп. стран СНГ “Атмосферная радиация” (МСАР-2006). Сб. Тезисов. СПб.: СПбГУ, 2006. С. 113–114.
- Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. и др.* Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Всер. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Королев, Московская обл., 2008 (в печати).
- 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.
- Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- Успенский А.Б.* Дистанционное зондирование атмосферы с помощью спутниковых Фурье-спектрометров // Междунар. конф. “Математические методы в геофизике”. Новосибирск: ИВМ и МГ, 2003. Ч. II. С. 579–584.
- Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н.* Применение метода главных компонент для анализа ИК-спектров высокого разрешения, измеренных со спутников // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 3. С. 26–33.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н.* Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.
- Aires F., Rossow W.B., Scott N.A. et al.* Remote sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument: 2. Simultaneous retrieval of temperature, water vapor, and ozone atmospheric profiles // J. Geoph. Res. 2002. V. 107. № D22. doi:10.1029/2001JD001591. P. 4620.1–12.
- Autmann H.H., Pagano R.J.* Atmospheric Infrared Sounder on the Earth Observing System // Opt. Eng. 1994. V. 33. P. 776–784.
- Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W.* Line Shape and the Water Vapor Continuum // Atm. Res. 1989. V. 23. P. 229–241.
- Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A. et al.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // J.Q.S.R.T. 2005. V. 96. P. 139–204.
- TIGR. Thermodynamic Initial Guess Retrieval (Электронный ресурс). 1995. Режим доступа: <http://ara.lmd.polytechnique.fr>
- Trotsenko A.N., Uspensky A.B., Kopylov A. et al.* Modular prototype processor for geophysical parameters retrieval from IASI: pilot version // “The 2003 Eumetsat Meteorological Satellite Conf.” Weimar, Germany, 2003. P. 110–117.
- Worden J., Kulawik S.S., Shephard M.W. et al.* Predicted errors of tropospheric emission spectrometer nadir retrievals from spectral window selection // J. Geoph. Res. 2004. V. 109. № D09. doi:10.1029/2004JD004522. P. 308.1–12.

Retrieving the Atmospheric Temperature/Humidity Profiles Using the High Spectral Resolution Data from IR Satellite Sensor IRFS-2

A. V. Polyakov^{1*}, Yu. M. Timofeyev¹, A. B. Uspensky²

¹Saint-Petersburg State University, Physical Faculty

²Scientific Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta” (SRC “Planeta”), Moscow

Potential errors of retrieving the atmospheric temperature/humidity profiles with using the measurements of satellite IRFS-2 planned to be launched aboard “Meteor-M” № 2 are studied. The study has been based on developed atmospheric radiative code in IR spectral range, the representative ensemble of temperature/humidity profiles and numerical experiments using the multiple linear regression method. The study has shown that measurements of outgoing thermal radiation with the IRFS-2 allows for decreasing the uncertainties in the temperature profile from 10 K to ~1 K in the 0–50 km height layer.

Key words: atmosphere model, infrared, humidity, temperature, profile, multiple regression, spectral resolution.