

ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИК-ЗОНДИРОВЩИКОВ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ (ИКФС-2)

© 2010 г. А. В. Поляков^{1*}, Ю. М. Тимофеев¹, А. Б. Успенский²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет

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

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

Поступила в редакцию 10.05.2009 г.

На основе численного моделирования космического эксперимента с прибором ИКФС-2 оценены потенциальные погрешности определения содержания различных малых газовых составляющих атмосферы. Относительные погрешности определения профиля озона составляют в среднем ~15–30% на высотах 0–20 км, 10–15% в стратосфере при использовании локальных решающих операторов. В районе максимума содержания озона относительные погрешности составляют 8–10%. Потенциальные погрешности определения общего содержания озона составляют 1.6–5% в зависимости от широтной зоны. Измерения ИКФС-2 позволяют получить величины общего содержания закиси азота с погрешностью 1.5–2.1% и общего содержания метана с погрешностью 1.7–2.3% в зависимости от широтного пояса.

Ключевые слова: атмосфера, малые газовые составляющие, содержание озона, численное моделирование, ИК-диапазон, спутниковый сенсор.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность мониторинга содержания озона и малых газовых составляющих (МГС) атмосферы в настоящее время обусловлена изучением стабильности озонового слоя и современных изменений климата Земли (WMO..., 2002; IPCC..., 2007). Как известно, за последние десятилетия наблюдались уменьшения общего содержания озона в различных регионах земного шара, что привело к увеличению (в ряде районов до 10–20%) УФ-освещенности поверхности. В ряде статей (Yang et al., 2005; Yang et al., 2006; Zanis et al., 2006) предприняты попытки обнаружения замедления разрушения озонового слоя планеты или даже начала его восстановления. Глобальный контроль состояния озоносферы необходимо продолжать с учетом, в частности, необходимости оценок эффективности принятых международных мер по ограничению антропогенных выбросов различных озоноразрушающих газов.

В последние десятилетия наблюдался также рост содержания отдельных парниковых газов, являющийся (по мнению большинства ученых, основанному на результатах численного моделирования) основной причиной роста приземных температур в прошедшее столетие. Прогнозы из-

менений климата свидетельствуют о возможности значительных изменений температуры в различных регионах земного шара, продолжительности вегетационного периода в средних и полярных широтах, режима осадков и циркуляции атмосферы и океана и т.д.

В связи с изложенным выше большой интерес представляет изучение возможностей спутникового мониторинга содержания озона и ряда парниковых газов с помощью ИК-зондировщика ИКФС-2 (входит в состав перспективного КА “Метеор-М” № 2).

В настоящей работе, продолжающей исследования (Поляков и др., 2009а; Поляков и др., 2009б), рассмотрен метод “обращения” данных измерений ИКФС-2 для восстановления профиля отношения смеси и общего содержания (ОС) озона, а также определения ОС метана и закиси азота. Приведены результаты испытания метода на смоделированных измерениях ИКФС-2.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Физико-математическая модель формирования уходящего инфракрасного (ИК) излучения атмосферы в спектральной области измерений

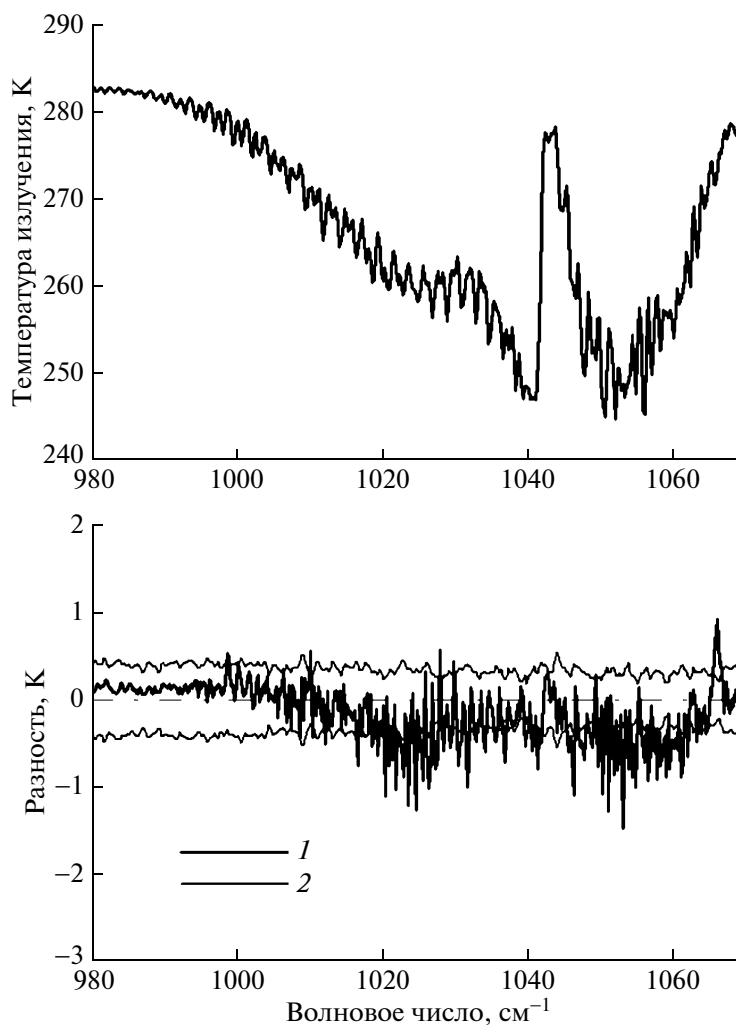


Рис. 1. Сравнения рассчитанных и измеренных с помощью IASI спектров (в радиационных температурах) в спектральной области полосы поглощения озона. Вверху: измеренный спектр, внизу: разность “расчет–измерение” (1) и “коридор” СКО-измерений (2).

ИКФС-2 описана в работе (Поляков и др., 2009а). На рис. 1 приведен пример сопоставлений расчетного спектра уходящего излучения в полосе поглощения озона 9.6 мкм (использована разработанная нами радиационная модель) с фактическими измерениями прибора IASI, имеющего характеристики, близкие к ИКФС-2.

Как следует из рис. 1, различия между расчетом и экспериментом (в терминах радиационной температуры) во многих случаях не превышают 1 К, что говорит о достаточно высоком качестве разработанной радиационной модели.

При использовании регрессионного метода обращения спутниковых данных для построения решающих операторов и получения статистически обоснованных результатов численных экспериментов необходимо располагать выборками достаточно большого объема, включающими со-

вокупность взаимно согласованных параметров состояния системы атмосфера–поверхность, а также расчетных спектров уходящего излучения, статистические характеристики которых адекватны естественным. В статьях (Поляков и др., 2009а; Поляков и др., 2009б) содержится описание выборки профилей температуры, влажности и содержания озона, температуры поверхности и ее излучательной способности, построенной на основе известного банка данных “TIGR” (TIGR..., 2000). Естественные вариации (среднеквадратичные отклонения) содержания озона в относительных единицах для различных подансамблей состояния атмосферы в большей части рассматриваемого высотного диапазона малы (10–20%) и только на высотах 0–20 км достигают 40–80%. Минимальные относительные вариации наблюдаются для тропических широт, а максимальные — для

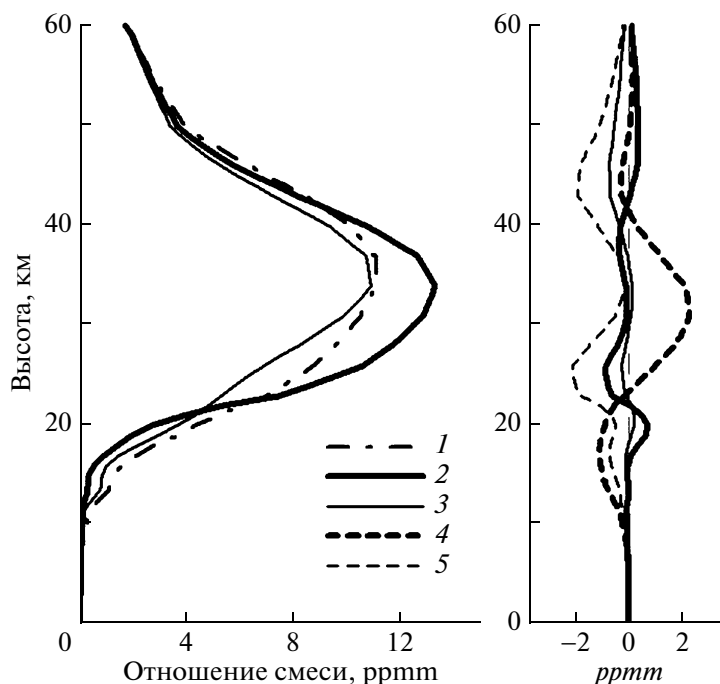


Рис. 2. Примеры восстановления профилей отношения смеси озона. Слева: средний профиль озона – 1; профиль 873 (точный) – 2; профиль 1251 (точный) – 3. Справа: разность “восстановленный–точный” (*a posteriori* погрешность) для профиля 873 – 2; разность “восстановленный–точный” (*a posteriori* погрешность) для профиля 1251 – 3; разность “точный–средний” (*a priori* погрешность) для профиля 873 – 4; разность “точный–средний” (*a priori* погрешность) для профиля 1251 – 5.

глобального ансамбля, а также на некоторых высотах для подансамбля “средние широты 2” (Поляков и др., 2009а).

В спектральной области измерений ИКФС-2 расположены полосы поглощения CH_4 и N_2O . Профили отношения смеси N_2O и CH_4 моделировались как случайные векторы с заданными средним значением и ковариационной матрицей. В качестве средних значений были выбраны профили из модели AFGl86 (Anderson et al., 1986), соответствующие средним широтам и летнему сезону. В качестве ковариационных матриц взяты модельные матрицы вида

$$d_{ij} = \delta_i \delta_j \exp\left[-\frac{(z_i - z_j)^2}{r^2}\right], \quad (1)$$

где z – высота; δ – среднеквадратическое отклонение на заданной высоте; r – радиус корреляции; i и j – номера высотных уровней.

Количество наборов профилей атмосферных параметров в базе данных TIGR равно 2311. Соответственно случайным образом моделировались 2311 профилей содержания N_2O и CH_4 . Модели-

рование случайных распределений N_2O и CH_4 требует задания вертикального профиля вариаций указанных параметров и значения радиуса корреляции. В основу задаваемых профилей вариаций в тропосфере положены обобщенные литературные данные наземных и самолетных измерений. Для стратосферы использовались профили вариаций, полученные в спутниковом эксперименте с аппаратурой CRISTA (Grossman et al., 2004), осредненные по широтным зонам в диапазоне 75° ю.ш. – 75° с.ш. Значение радиуса корреляции для построения модельных ковариационных матриц выбиралось на основе анализа ковариационных матриц, полученных по данным эксперимента CRISTA. Наилучшая аппроксимация вертикального поведения экспериментальных коэффициентов корреляции достигается при $r = 7$ км для закиси азота и $r = 12$ км для метана. Расчет стандартных отклонений *std* на основе построенной модели для общего содержания закиси азота и метана дал значения соответственно 6.4% и 6.2%, что согласуется с экспериментальными данными. Так, например, для метана характерные значения *std* общего содержания составляют в средних широтах 3–5% (Макарова и др., 2006).

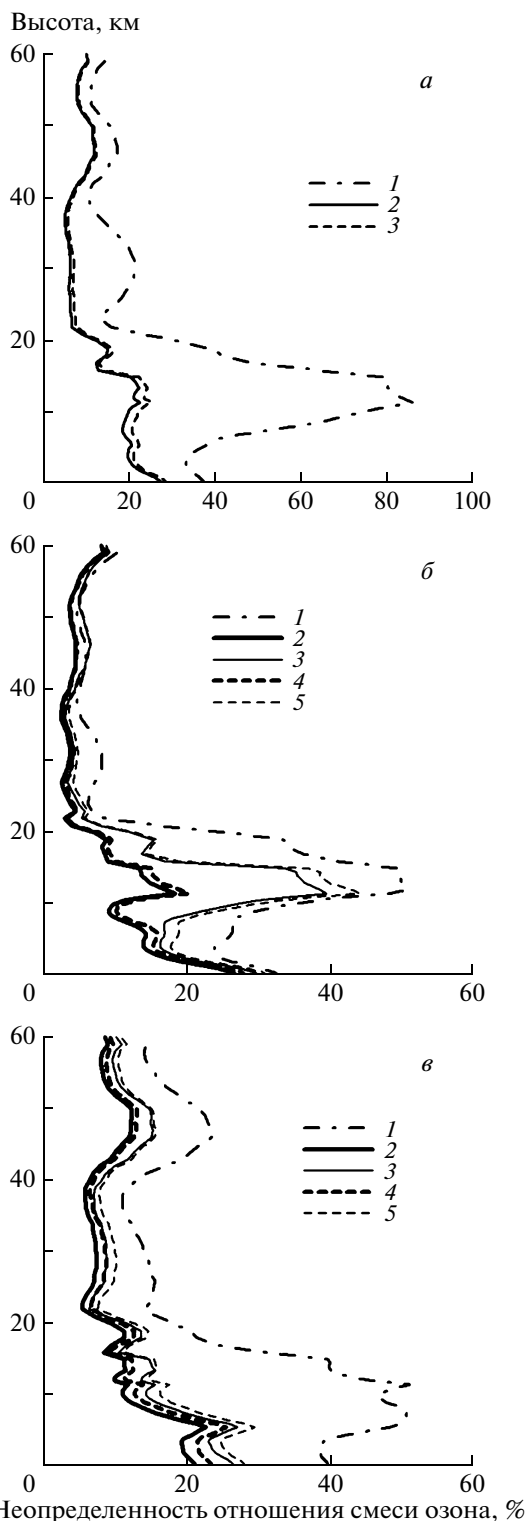


Рис. 3. Среднеквадратичные относительные (%) погрешности восстановления отношения смеси озона и его априорная изменчивость: 1 – априорное СКО; 2, 3 – среднеквадратичная разность “восстановленный–точный” профилей для локального РО при следующих условиях: 2 – погрешность измерения радиации; 1, 3 – погрешность измерения радиации 2; 4, 5 – на рис. 3б и в – то же, что и 2, 3, но для глобального РО. Рис. 3а–в – полная выборка, 2311 реализаций, тропическая выборка и среднеширотная выборка 2 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ДИСТАНЦИОННОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

В соответствии с описанной регрессионной методикой (Поляков и др., 2009а) были построены решающие операторы (РО), и выполнены численные эксперименты по восстановлению вертикальных профилей отношения смеси и ОС озона, а также ОС CH_4 и N_2O .

Погрешности определения содержания озона

Рассмотрим вначале результаты экспериментов по дистанционному определению профилей отношения смеси (q_{O_3}) и ОС озона.

Примеры восстановления профилей q_{O_3} даны на рис. 2. В левой части рис. 2 приведены два профиля – 873 и 1251, – представляющие подвыборку “средние широты 1” и средний профиль отношения смеси озона (Поляков и др., 2009а). В правой части того же рисунка приводятся разности: пунктирными линиями – априорные (т.е. до измерения, когда наилучшую оценку профиля озона представляет средний профиль, разность между средним профилем и точными профилями) и апостериорные (т.е. разность между восстановленными после обращения измерений и точными профилями). Из рис. 2 (левая часть) видно, что выбранные профили озона заметно отличаются от среднего. Правая часть рис. 2 демонстрирует существенное уменьшение погрешностей оценки профилей озона после измерения и решения обратной задачи. Так, если для профиля 873 максимальное отличие среднего профиля от точного составляет более 2 *ppm*, то отличие восстановленного профиля от точного не превосходит по абсолютной величине 1 *ppm*. Аналогичный результат с близкими величинами демонстрирует и пример с профилем 1251.

Среднеквадратические погрешности восстановления профилей озона (в относительных единицах) приведены на рис. 3а для глобального ансамбля, двух подансамблей и двух погрешностей измерения излучения (рис. 3б, 3в).

Анализ рис. 3, где изображены типичные примеры высотного поведения относительных погрешностей восстановления озона, позволяет сделать следующие выводы:

1) применительно к полной модельной выборке (рис. 3а) и к отдельным подвыборкам (рис. 3б и 3в) наблюдается заметное уменьшение априорной неопределенности (АН) содержания озона. Это уменьшение максимально на высотах 10–20 км. Для глобальной выборки максимум информатив-

Таблица 1. Среднеквадратичная погрешность восстановления и априорная неопределенность ОС озона, %

Широтный пояс	Общий РО		Локальный РО		Априорная неопределенность
	Погрешность 1	Погрешность 2	Погрешность 1	Погрешность 2	
Все	4.3	5.0	—	—	20.4
Тропики	3.2	3.9	1.3	1.6	7.1
Средние широты 1	3.6	4.1	1.9	2.5	14.6
Средние широты 2	3.9	4.6	2.9	3.7	16.8
Полярные широты 1	7.0	7.8	3.5	4.7	17.3
Полярные широты 2	4.7	5.7	4.1	5.0	24.0

ности дистанционного метода приходится на высоты ~10–15 км и при этом АН на этих высотах уменьшается в 2–4 раза. Для локальных выборок такое уменьшение на этих высотах составляет 1.5–3 раза. В стратосфере уменьшение АН не превышает фактора 2. Последнее обстоятельство обусловлено относительно малыми значениями АН на этих высотах (20–30%);

2) для выборок “тропики” и “полярные широты 1” использование глобального РО приводит к заметно большим погрешностям восстановления содержания озона, по сравнению с использованием локальных РО (рис. 3б). Этот эффект для случая тропиков наиболее сильно выражен ниже 20 км, а для выборки “полярные широты 1” – на всех высотах. Для других выборок влияние используемого РО невелико. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности локализации решающего оператора, по крайней мере, для тропических и полярных широт;

3) относительные погрешности определения озона составляют в среднем ~15–30% на высотах 0–20 км, в стратосфере – 10–15% при использовании локальных РО. В районе максимума содержания озона относительные погрешности составляют 8–10%. Относительно малые погрешности в стратосфере обусловлены, главным образом, малой изменчивостью содержания озона на этих высотах. Для всех рассмотренных случаев погрешность измерений излучения мало влияет на погрешность восстановления профиля озона.

Анализ относительных погрешностей восстановления профилей содержания озона для различных выборок показал, что вариации этих погрешностей в стратосфере значительны. Минимальные погрешности наблюдаются для тропиков, максимальные – для средних широт. В большей части рассматриваемого высотного диапазона (0–60 км) эти погрешности составляют 5–20%. Выше 20 км

они, как правило, не превышают 10–13%. В тропосфере наблюдается рост погрешностей до 15–26% в зависимости от выборки. Приведенный рисунок не следует трактовать как следствие высокой информативности (чувствительности) данных измерений ИКФС-2 по отношению к вариациям содержания озона. Как уже отмечено выше, малые значения относительной погрешности выше 20 км обусловлены малой естественной изменчивостью содержания озона на этих высотах.

Отметим, что приведенные выше погрешности относятся к восстановлению профилей на высотной сетке с шагом 0.5 км. Значительные уменьшения погрешностей (в 1.5–3 раза) могут быть достигнуты при восстановлении содержания в “толстых” слоях атмосферы.

Перейдем теперь к результатам экспериментов по оценке ОС озона. Данные о погрешности определения ОС озона для различных подансамблей, погрешности измерений и использованных различных РО сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, потенциальные погрешности определения ОС озона по данным измерений ИКФС-2, могут составлять 1.3–7.8% в зависимости от широтного пояса, используемого решающего оператора и погрешности измерений излучения. Минимальная погрешность 1.3% достигается для тропической атмосферы при использовании локального решающего оператора и меньшей погрешности измерений. Это обусловлено прежде всего малой априорной неопределенностью ОС озона, составляющей 7.1%. Максимальная погрешность – 7.8% наблюдается для подансамбля “полярные широты 1” при большей погрешности и использовании глобального решающего оператора. При этом априорная неопределенность ОС озона для этого ансамбля составляет 17.3%. Следует отметить, что погрешность ОС озона существенно зависит от

Таблица 2. Среднеквадратичная погрешность восстановления и априорная неопределенность ОС метана (CH₄), %

Широтный пояс	Общий РО		Локальный РО		Априорная неопределенность
	Погрешность 1	Погрешность 2	Погрешность 1	Погрешность 2	
Все	2.11	2.35	—	—	4.47
Тропики	1.89	2.05	1.47	1.68	4.43
Средние широты 1	1.73	1.96	1.49	1.74	4.49
Средние широты 2	1.90	2.21	1.55	1.84	4.45
Полярные широты 1	2.84	3.13	1.57	2.07	4.39
Полярные широты 2	2.49	2.83	2.08	2.44	4.52

Таблица 3. Среднеквадратичная погрешность восстановления и априорная неопределенность общего содержания закиси азота (N₂O), %

Широтный пояс	Общий РО		Локальный РО		Априорная неопределенность
	Погрешность 1	Погрешность 2	Погрешность 1	Погрешность 2	
Все	2.34	2.53	—	—	4.54
Тропики	2.24	2.39	1.93	2.15	4.58
Средние широты 1	2.07	2.26	1.83	2.05	4.53
Средние широты 2	2.16	2.43	1.71	2.04	4.49
Полярные широты 1	2.86	2.99	1.66	2.11	4.12
Полярные широты 2	2.78	2.99	2.25	2.56	4.56

локализации решающего оператора, от широтного пояса (подвыборки) и в меньшей степени — от погрешности измерения излучения. Максимальные погрешности для локального оператора наблюдаются для выборки “полярные широты 2”, которая характеризуется очень большой протяженностью тропопаузы. Такая протяженная тропопауза (почти изотермическая), достигающая высот озонного максимума около 30 км, может препятствовать определению количества озона на этих высотах, так как при этом излучение слабо зависит от высоты, с которой исходит, и изменение функций пропускания, регистрирующее изменение количества озона, не приводит к изменению излучения.

Вместе с тем при использовании локальных РО и малой погрешности измерений уходящего излучения потенциальные погрешности определения ОС озона не превосходят 4.1%, а если исключить полярные области, то и 3%, что соответствует примерно 10 Д.Е. Оптимальная погрешность измерений ОС озона согласно требованиям

Всемирной метеорологической организации (ВМО) должна составлять 5–6 Д.Е., предельная — 20 Д.Е. Таким образом, использование измерения ИКФС-2 и метода множественной линейной регрессии позволяет получать ОС озона с погрешностью, промежуточной между оптимальной и предельной по терминологии ВМО.

В заключение данного раздела коротко остановимся на сравнительном анализе эффективности предложенного метода и других методов обращения данных ИК-зондировщиков (типа IASI) в целях определения ОС озона и q_{oz} , (Успенский и др., 2005). Близкий к предложенному статистический метод обращения данных IASI (регрессия на главные компоненты) рассмотрен в работе (Aires et al., 2002). Точностные характеристики оценивания ОС озона в экспериментах с моделированными данными IASI подобны приведенным выше. В работах (Uspensky et al., 2003; Trotsenko et al., 2003; Успенский и др., 2003) предложены и протестированы процедуры оценивания ОС озона и параметров вертикального распределения

озона по данным измерений IASI в специально отобранном подмножестве каналов, основанные на применении линейной регрессии (этап I решения обратной задачи) и последующем уточнении регрессионных оценок с помощью физического метода обращения (этап II). Согласно результатам экспериментов с моделированной информацией, точностные характеристики оценок ОС озона близки к приведенным выше (погрешность оценивания ОС озона – порядка 6–7%, погрешность оценивания содержания озона в слое 0–20 км – не хуже 15%). В работе (Turquety et al., 2004) предложено для оценки ОС озона и q_{oz} использовать нейросетевые алгоритмы (статистический подход, близкий к регрессионным методам). Величины ОС озона, а также содержание озона в слоях 0–6, 0–12, 0–16 км определяются по моделированным данным IASI с погрешностями 1.5, 28, 15 и 9% соответственно.

Общий вывод из приведенного анализа заключается в том, что использование данных ИК-зондировщиков (ИКФС-2, IASI, AIRS) позволяет получать достаточно точные оценки ОС озона (погрешность – не хуже 5–7%).

Погрешности определения МГС

В табл. 2 и 3 приведены погрешности определения ОС метана и закиси азота при использовании различных РО и различных погрешностях измерений излучения. Хотя построенные статистические модели вертикального распределения этих газов не зависят от широтных зон, погрешности их восстановления могут демонстрировать такую зависимость, из-за влияния, в первую очередь, температурного профиля и профиля влажности.

Из табл. 2 и 3 видно, что обращение измерений ИКФС-2 позволяет оценивать величины ОС закиси азота и метана с погрешностями 1.5–3% в зависимости от локализации РО и погрешности измерений. При этом локализация РО существенна – она позволяет в среднем уменьшить погрешности на 0.2–0.4%, а максимально – для закиси азота на 1.24% (для выборки “полярные широты 2” и “погрешности 1”) и для метана на 1.2% – для того же случая. Также следует отметить заметное влияние погрешности измерений, ее уменьшение в среднем сокращает погрешности на 0.2–0.3%, что для характерных величин, близких к 2%, является значительным. Максимальное уменьшение погрешности определения ОС за счет уменьшения погрешности измерений излучения достигает 0.5 и 0.45% для закиси азота и метана соответственно и наблюдается для локализованного оператора и выборки “полярные широты 1”. В среднем априорные неопределенности в ОС

этих газов уменьшаются после проведения спутниковых измерений в 1.5–2 раза.

Коротко о других подходах к оцениванию ОС метана и закиси азота по данным ИК-зондировщиков. В уже цитированной работе (Turquety et al., 2004) применение нейросетевого алгоритма к моделированным данным IASI позволяет получать оценки ОС метана с погрешностями 2–3%, что фактически близко к данным табл. 2. В работах (Trotsenko et al., 2003; Успенский и др., 1998) предложен физический метод обращения данных IASI в ограниченном подмножестве каналов, позволяющий получать оценки ОС метана и закиси азота с погрешностями 2.5–5% и 4–9% соответственно (эксперименты с моделированной информацией).

В области измерений прибора ИКФС-2 присутствуют слабые полосы поглощения фреонов F11 и F12 (F11 имеет максимум поглощения в области 840–850 см^{-1} , F12 около 920 см^{-1}). Предварительные оценки возможностей измерений их общих содержаний показали, что погрешности определения их ОС составляют 25% для F11 и 15% для F12. Отметим, что если рассматривать задачу измерения ОС фреонов в атмосфере с меньшим пространственным и временным разрешением, можно использовать статистическое осреднение относительно большого количества измерений в указанных спектральных областях и тем самым заметно повысить точность определения ОС фреонов по сравнению с единичными измерениями.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Анализ потенциальных возможностей определения содержания озона и различных малых газовых составляющих с помощью спутниковых измерений прибором ИКФС-2 показал, что:

1) относительные погрешности определения профиля озона составляют в среднем ~15–30% на высотах 0–20 км и 10–15% в стратосфере при использовании локальных РО. В районе максимума содержания озона относительные погрешности составляют 8–10%. Максимальная информативность дистанционного метода соответствует высотам 10–20 км, где наблюдается максимальная естественная изменчивость содержания озона;

2) потенциальные погрешности определения общего содержания озона составляют 1.3–5% в зависимости от широтной зоны. При определении профилей отношения смеси озона и его общего содержания рекомендуется использовать решающие операторы, рассчитанные для соответствующих подансамблей данных (локализованных по широте и сезону);

3) измерения ИКФС-2 позволяют получить величины ОС закиси азота с погрешностью 1.5–2.1% и ОС метана с погрешностью 1.7–2.3% в зависимости от широтного пояса. При определении ОС этих газов целесообразно использование локализованных РО;

4) предварительные оценки возможностей определения ОС фреонов F11 и F12 показывают, что погрешности единичных измерений составляют ~25%. При усреднении измерений за счет снижения пространственного и временного разрешения эти погрешности могут быть уменьшены в 2–3 раза.

В заключение отметим, что приведенные в работе погрешности определения различных характеристик газового состава следует рассматривать как потенциальные, т.к. в проведенных исследованиях учитывались лишь случайные погрешности измерений уходящего теплового излучения прибором ИКФС-2. При интерпретации реальных измерений погрешности решения обратных задач будут также определяться погрешностями абсолютной калибровки измерений, учетом (исключением) влияния облачности, качеством радиационной модели атмосферы и т.д.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Минобрнауки РНП. 2.1.1.4166, РНП.2.2.1.1.3836 и РФФИ № 09-05-00797.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макарова М.В., Поберовский А.В. и др.* Исследование процессов формирования поля метана в атмосфере северо-западного региона Российской Федерации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 237–249.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009а. № 5. С. 3–10.
- 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. 2009б. (В печати).
- Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н.* Моделирование дистанционных измерений вертикального распределения озона в атмосфере по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 1. С. 49–57.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н., Романов С.В.* Определение общего содержания малых газовых составляющих атмосферы с помощью ИК-зондировщика IASI. II. Анализ точности результатов зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 79–86.
- 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., Chedin A.* Remote sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument. 2. Simultaneous retrieval of temperature, water vapor, and ozone atmospheric profiles // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D22.4620. doi:10.1029/2001JD001591.
- Anderson G.P., Clough S.A. et al.* AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). AFGL-TR-86-0110 // Environ. Res. Papers. 1986. № 954. 43 p.
- Grossmann K.U., Gusev O. et al.* A review of the scientific results from the CRISTA missions // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 1715–1721.
- IPCC, 2007: Fourth Assessment Report (AR4) “Climate Change 2007”. Working Group I Report “The Physical Science Basis”. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>
- TIGR. Thermodynamic Initial Guess Retrieval. <http://ara.lmd.polytechnique.fr>
- Trotsenko A.N., Uspensky A.B. et al.* Modular prototype processor for geophysical parameters retrieval from IASI: pilot version // The 2003 Eumetsat Meteorological Satellite Conf. Weimar: Germany, 29 September–03 October, 2003. P. 110–117.
- Turquetty S., Hadji-Lazaro J. et al.* Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. №. D21301. doi: 10.1029/2004JD004821.
- Uspensky A.B., Romanov S.V., Trotsenko A.N.* Can a statistical regression be valuable tool for the inversion of advanced IR sounders data? // Proc. 13th Intern. TOVS Study Conf. Sainte-Adele, Quebec, Canada, 29 October–04 November, 2003. P. 652–659.
- WMO, 2002: Scientific Assessment of Ozone Depletion // Global Ozone Research and Monitoring project. Report № 47. Geneva, Switzerland, 2002. 498 p.
- Yang E.-S., Cunnold D.M. et al.* Change in ozone trends at southern high latitudes // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L12812. doi:10.1029/2004GL022296.
- Yang E.-S., Cunnold D.M. et al.* Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. doi:10.1029/2005JD006371.
- Zanis P., Maillard E. et al.* On the turnaround of stratospheric ozone trends deduced from the reevaluated Umkehr record of Arosa, Switzerland // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D22307. doi:10.1029/2005JD006886.

Possibilities for Retrieving the Ozone and Trace Gases from Data of Satellite IR Sounders IRFS-2 with High Spectral Resolution

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeyev, A. B. Uspensky

Saint-Petersburg State University, Physical Faculty

Scientific Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta" (SRC "Planeta"), Moscow

Potential errors of retrieving different atmospheric trace gases have been estimated by numerical modeling the space experiment with IRFS-2 device. If local solving operators are used, relative errors of the ozone profile retrieval on the average are ~15–30% at the 0–20 km altitudes and 10–15% in the stratosphere. In an area of the ozone maximum, relative retrieval errors are 8–10%. Potential errors of total ozone amount retrieval are 1.6–5% depending on latitude zone. Total column amount nitrous oxide and methane are retrieved with errors of 1.5–2.1% and 1.7–2.3%, respectively, depending on latitude zone.

Key words: atmospheric trace gases, ozone amount, numerical modeling, IR spectral range, satellite sounder.