

Оптимальная параметризация спектров уходящего теплового излучения на примере данных спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2

Я.А. Виролайнен, Ю.М. Тимофеев, А.В. Поляков, А.Б. Успенский*

Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 3.07.2009 г.

На основе ансамбля рассчитанных спектров уходящего теплового излучения в области волновых чисел 660–2010 см⁻¹ (2311 реализаций), моделирующих глобальные измерения спутниковым прибором ИКФС-2, проанализированы информативность измерений уходящего теплового излучения в терминах объема информации по Козлову, числа степеней свободы, а также прироста информации по Шеннону. Во всей спектральной области (660–2010 см⁻¹) в измерениях уходящего излучения присутствуют 106 независимых параметров. Проанализирована точность оптимальной параметризации спектрального хода излучения, основанная на разложении излучения по собственным векторам спектральной ковариационной матрицы. Показано, что для достижения среднеквадратической погрешности параметризации, сравнимой со случайным шумом измерения для различных областей спектра, достаточно использовать от 20 до 50 первых собственных векторов.

Ключевые слова: параметризация спектров, ИК-Фурье-спектроскопия, информативность измерений, полосы поглощения атмосферных газов; spectral parameterization, IR Fourier-spectroscopy, information content of measurements, absorption bands of atmospheric gases.

Введение

Перспективным направлением развития спутникового зондирования атмосферы и подстилающей поверхности в различных областях спектра в настоящее время является использование приборов с достаточно высоким спектральным разрешением и большим числом каналов измерений. Так, в частности, приборы ИК-области спектра AIRS и IASI имеют спектральное разрешение ~0,5–2,0 см⁻¹ при общем количестве каналов 2348 и 8461 соответственно [1, 2]. Как показал анализ фактических данных AIRS и IASI, они обладают высокой информативностью и позволяют восстанавливать параметры атмосферы и поверхности с высокой точностью.

Большое число каналов измерений создает определенные проблемы при оперативной обработке и анализе данных, для решения которых были предложены различные подходы.

1. Использование относительно узких «спектральных окон» для определения конкретных параметров атмосферы и поверхности [3].

2. Выделение ограниченной совокупности «оптимальных» каналов или «суперканалов» с максимальной информативностью относительно изучаемых параметров [4].

3. Оптимальная параметризация спектров уходящего излучения с помощью метода главных компонент (МГК) или разложение по базису эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) [5–8].

Оптимальная параметризация, основанная на применении алгоритмов МГК, позволяет осуществлять [9–12]:

- значительное «сжатие» информации для ее хранения,
- декорреляцию измерений в отдельных каналах,
- анализ информативности дистанционных измерений,
- оптимизацию состава измерений применительно к той или иной тематической задаче «обращения» данных,
- частичное подавление или фильтрацию шума измерений,
- эффективное усвоение (ассимиляцию) данных в моделях анализа и прогноза погоды.

В последние годы появились новые приложения оптимальной параметризации спектров высокого разрешения, связанные с детектированием спектров, «искаженных» влиянием облачности (см., например, [13]), а также с созданием «супербыстрых» моделей радиационных расчетов, основанных на использовании алгоритмов МГК (Principal Component-based Radiative Transfer forward Model, или PCRTM), см., например, [14]. Отметим, что при использовании алгоритмов МГК отдельные спектры с «аномальными» особенностями, не укладывающиеся в использованную при построении оптимальной

* Яна Акселевна Виролайнен (Virolainen@JV14952.spb.edu); Юрий Михайлович Тимофеев (tim@troll.phys.spbu.ru); Александр Викторович Поляков (polyakov@troll.phys.spbu.ru); Александр Борисович Успенский.

параметризации статистику, будут недостаточно точно воспроизведены и исключены из рассмотрения (как «зашумленные»). Однако использование более репрезентативной статистики атмосферных состояний может в значительной степени минимизировать этот отрицательный эффект. Кроме того, аппарат МГК позволяет детектировать спектры с аномальными особенностями для последующего анализа (см. ниже).

В настоящее время в России осуществляется новый этап реализации дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности повышенной точности и вертикального разрешения, основанный на создании бортовых ИК-Фурье-спектрометров ИКФС-2 для перспективных метеорологических спутников серии «Метеор-М» [15, 16]. Спектральная полоса измерения прибора 660–2010 см⁻¹, разрешающая способность 1200–4000, пространственное разрешение в надире около 35 км (1 пиксель). Общее число отсчетов в измеряемом спектре составляет 5400. В [17–19] изучены потенциальные погрешности температурно-влажностного зондирования, определения содержания озона, CH₄ и N₂O, температуры и излучательной способности поверхности суши при использовании для «обращения» данных метода множественной линейной регрессии. В настоящей статье дается оценка потенциальной информативности измерений уходящего теплового излучения прибором ИКФС-2 по отношению к совокупности параметров атмосферы и поверхности суши, а также анализ возможностей использования алгоритмов МГК для оптимального параметрического представления спектров.

1. Детали расчетов

На первом этапе исследований с помощью оригинального радиационного кода, основанного на прямом расчете излучения неоднородной атмосферы (см. подробнее в [17]), была промоделирована представительная глобальная выборка спектров $\{I_j(v_i)\}$, измеряемых прибором ИКФС-2. Здесь v_i – волновое число i -го канала, $i = 1, \dots, 5400$; номер реализации $j = 1, \dots, 2311$. Для расчетов $I_j(v_i)$ привлекались атмосферные модели из известного ансамбля TIGR, описание которого можно найти в [17, 20]. Далее каждый спектр рассматривается как вектор размерности $(N \times 1)$, $N = 5400$. Случайная измерительная погрешность прибора ИКФС-2, согласно [15, 16], имеет спектральный ход: для области 660–790 см⁻¹ погрешность (в терминах стандартного отклонения $\sigma(v)$) равна 0,1 мВт/(м²·ср·см⁻¹), а при $v = 2000$ см⁻¹ составляет 0,38 мВт/(м²·ср·см⁻¹). Для приведения к единому уровню погрешности [0,1 мВт/(м²·ср·см⁻¹)] сигналы во всех каналах были пронормированы: $I'(v) = I(v) \frac{0,1}{\sigma(v)}$. Для ансамбля пронормированных спектров $\{I'(v)\}$ была построена выборочная ковариационная матрица K , а также найдены собственные векторы $\{f_\alpha(v)\}$ и собственные числа $\{\lambda_\alpha\}$, $\alpha = 1, \dots, N$.

Далее на основе известных выражений была количественно оценена информативность измерений прибором ИКФС-2 во всем спектре и в отдельных участках. Помимо общепринятых показателей информативности, рассчитывалась информационная характеристика, популярная в англоязычной научной литературе – «число степеней свободы для полезного сигнала и для шума» (degrees of freedom for signal and for noise) [9]. Расчеты проводились по следующим формулам:

а) объем информации по В.П. Козлову [21]:

$$V = \sqrt{\prod_{i=1}^n \lambda_i};$$

б) «число степеней свободы» для сигнала:

$$d_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i / (1 + \lambda_i); \text{ и шума: } d_N = \sum_{i=1}^n 1 / (1 + \lambda_i);$$

в) количество информации по Шеннону [9]:

$$\Delta I = \frac{1}{2} \log \prod_{i=1}^n (1 + \lambda_i).$$

Величина n в приведенных формулах выбирается из условия $n = \max \{\alpha: \lambda_\alpha \geq 1\}$, причем, как правило, $n \ll N$.

На втором этапе исследований выполнена оптимальная параметризация всех спектров ансамбля с использованием различного числа векторов (ЭОФ) в разложении. Оптимальное параметрическое представление сигналов в каналах или спектрального хода излучения $I(v)$ имеет вид [5]:

$$\tilde{I}_j(v) = \bar{I}(v) + \sum_{p=1, n} a_p f_p(v).$$

Здесь $\bar{I}(v)$ – средний по выборке спектр; $f_p(v)$ – собственные векторы ковариационной матрицы K , образующие базис ЭОФ;

$$a_p = \sum_{i=1, N} \delta I'_j(v_i) f_p(v_i),$$

где $\delta I'_j = I'_j - \bar{I}$ – соответствующие коэффициенты разложения, или главные компоненты (ГК). Отметим, что ГК являются некоррелированными, в отличие от сигналов I в различных каналах.

Условие выбора n имеет ясную трактовку [6, 8, 21]: величина λ_α является отношением дисперсии ГК к дисперсии шума в направлении соответствующего собственного вектора f_α , иными словами, представляет отношение «сигнал-шум». «Граничное» значение $\lambda_n = 1$ соответствует нулевому информационному вкладу измерений. Число n поэтому в ряде публикаций называют показателем информативности. Следует отметить, что условие выбора n носит эвристический характер. Его выполнение для моделированных данных (с известными матрицами K_f , K_e) действительно позволяет

выделить полезный сигнал на фоне шума, а для реальных данных (когда известны только выборочные оценки K_f , K_e) требуется дополнительный анализ соотношения между потерей информативности и уровнем шума при замене спектра $I'(v)$ его оптимальным параметрическим представлением $\tilde{I}'(v)$. Дополнительные детали применения техники МГК см. в [6, 8, 21].

2. Характеристики информативности измерений прибора ИКФС-2

В табл. 1 приведены различные информационные характеристики данных измерений прибором ИКФС-2 для всей спектральной области полосы 660–2010 см^{-1} , а также для ряда подобластей.

Таблица 1

Информационные характеристики определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности прибором ИКФС-2

Спектральная область, см^{-1}	Показатель информативности	Информационный объем	Число степеней свободы	Количество информации по Шеннону, бит
660–2010	106	10^{90}	92,4	311
660–790	42	10^{40}	37,1	140
790–1260	70	10^{59}	61,5	203
1260–1650	22	10^{18}	19,2	63

В столбце 2 приводятся показатели информативности, т.е. количество собственных векторов n , для которых выполняется условие $\lambda_i \geq 1$. Разбиение по спектральным областям осуществлялось в соответствии с различными тематическими обратными задачами по восстановлению тех или иных параметров атмосферы и подстилающей поверхности (см. табл. 2). Следует отметить, однако, что информация о таких параметрах, как профили водяного пара и температуры, содержится и в других спектральных областях. В частности, по данным в полосе поглощения озона восстанавливается температура в стратосфере.

Измерения уходящего излучения прибором ИКФС-2 во всей спектральной области (660–2010 см^{-1}) позволяют восстановить 106 независимых параметров, при этом число различных состояний атмосферы, которые определяются информационным объемом по Козлову, составляет 10^{90} , а число степеней свободы, относящихся к измеряемому сигналу, – 92,4, прирост информации по Шеннону – 311 битов.

В области 660–790 см^{-1} , использующейся в основном для определения температурного профиля, могут быть восстановлены 42 независимых параметра (число степеней свободы для полезного сигнала – 37,1). Кроме температуры, это также некоторая информация об озоне и водяном паре. При этом число различных состояний атмосферы составляет 10^{40} . Прирост информации – 140 битов.

По измерениям уходящего излучения прибором ИКФС-2 в области 790–1260 см^{-1} можно определить 70 независимых параметров, а именно: получить

информацию о вертикальной термической структуре, содержании озона и водяного пара в атмосфере, а также о температуре и излучательных свойствах поверхности. При этом по измерениям могут быть различимы 10^{59} состояний этих параметров. Анализ числа степеней свободы показывает, что 61,5 из 70 независимых параметров относятся к полезному сигналу, остальные – к случайному шуму измерения. Информационное содержание (прирост информации по Шеннону) для этой спектральной области соответствует 203 битам.

По измерениям излучения в спектральной области 1260–1650 см^{-1} можно восстановить всего 22 параметра – кроме вертикальной структуры содержания водяного пара, это еще содержание метана и закиси азота, а также некоторая информация о температуре. Информационный объем измерений равен 10^{18} , число степеней свободы для измеренного сигнала – 19,2, количество информации – 63 бита.

3. Оптимальная параметризация моделированных спектров излучения

С помощью описанного выше аппарата построены параметрические представления каждого спектра из имеющегося ансамбля с учетом в разложении различного числа ЭОФ и определены погрешности параметризации (для того чтобы эмпирически оценить их оптимальное количество). Поскольку данные оценки являются предварительными (они не свободны от выборочных эффектов, кроме того, реальные характеристики прибора ИКФС-2 будут известны после его запуска в космос), то для простоты и наглядности число ЭОФ округлялось до десятков.

На рис. 1 показан спектральный ход среднеквадратической ошибки (СКО) оптимальной параметризации по всему ансамблю спектров с учетом в разложении 30, 40 и 50 (в зависимости от спектральной области) собственных векторов ковариационной матрицы K . Сплошной линией выделен уровень случайного шума измерения.

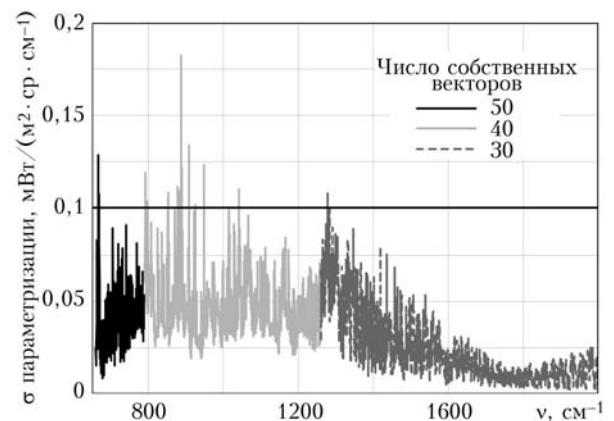


Рис. 1. Среднеквадратическая погрешность оптимальной параметризации спектров уходящего теплового излучения при использовании различного числа ЭОФ (50 векторов – 660–790 см^{-1} , 40 векторов – 790–1260 см^{-1} , 30 векторов – 1260–2010 см^{-1})

Отметим, что при учете 60 векторов СК-погрешность параметризации заведомо меньше случайного шума измерения для всего спектрального интервала. Как видно из рис. 1, при учете меньшего числа векторов в отдельных каналах величина СКО может несколько превышать шум.

Для более подробного анализа погрешности оптимальной параметризации были рассмотрены отдельные спектральные интервалы, используемые для восстановления того или иного параметра атмосферы или поверхности. На рис. 2 приведено отношение СКО параметризации к случайному шуму измерения для спектральных интервалов в полосах поглощения углекислого газа, озона, метана и закиси азота, водяного пара.

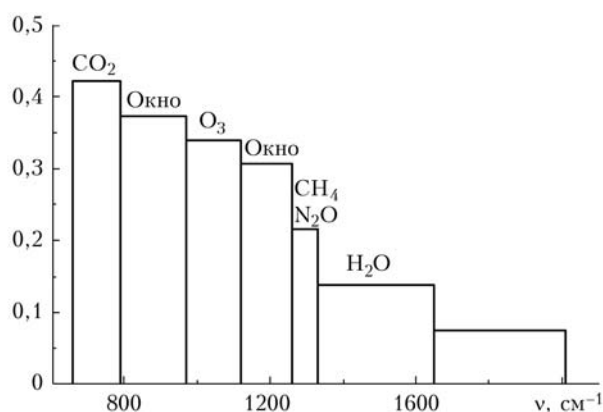


Рис. 2. Распределение отношения погрешности оптимальной параметризации к случайному шуму для различных спектральных интервалов

Кроме того, отдельно выделены участки окон прозрачности, по измерениям в которых происходит восстановление излучательной способности поверхностей и ее температуры, а также край полосы измерения прибора (1650–2000 см⁻¹). Из рис. 2 видно, что погрешности параметризации максимальны в области полосы поглощения углекислого газа, они уменьшаются с переходом в коротковолновую область спектра.

Полоса поглощения углекислого газа 15 мкм

Из рис. 1 видно, что для 15-мкм полосы, которая используется, в основном, для температурного зондирования атмосферы, при оптимальной параметризации учитываются первые 50 собственных векторов. Поскольку исходный ансамбль спектров $\{I_j(\nu)\}$ является достаточно большим (2311 реализаций), представляет интерес изучить распределение погрешностей по различным реализациям ансамбля, чтобы оценить процентное отношение количества спектров, в которых погрешность превышает случайный шум измерений (за счет аномальных особенностей в спектрах). В полосе углекислого газа были выбраны с этой целью несколько «характерных» каналов: канал 666,75 см⁻¹, в котором погрешность оптимальной параметризации максимальна, канал 705,5 см⁻¹, в котором погрешность

также выше среднего по интервалу, и канал 692 см⁻¹, в котором погрешность оптимальной параметризации типична для всего интервала. Для канала 666,75 см⁻¹ и одной реализации спектра погрешность оптимальной параметризации более чем на порядок превышает случайный шум измерения. В целом, для этого канала в 43 случаях из 2311 (1,9%) погрешность параметризации выше шума измерения при использовании 50 собственных векторов. На рис. 3 (вверху) показан канал с достаточно высокой погрешностью параметризации (705,5 см⁻¹).

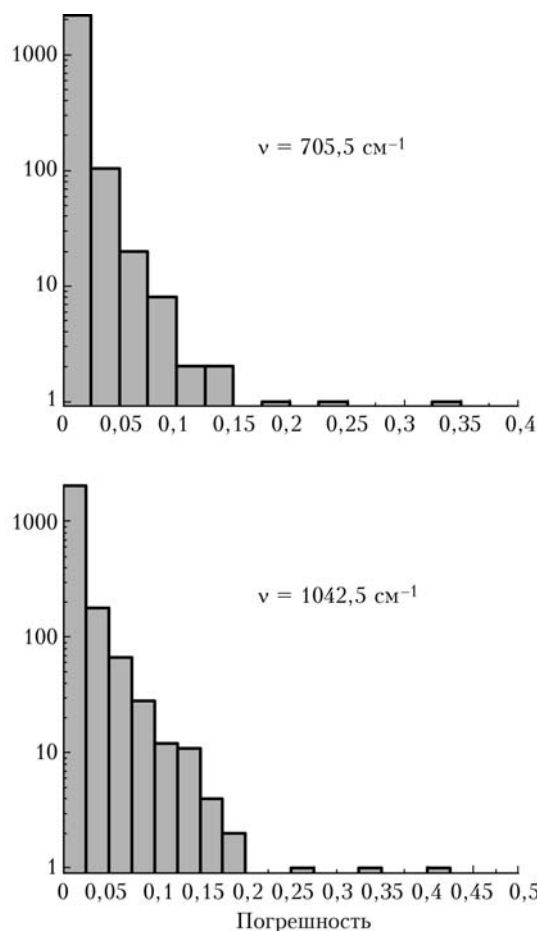


Рис. 3. Примеры гистограмм распределения погрешностей оптимальной параметризации по всему ансамблю спектров уходящего теплового излучения для некоторых каналов

Для этого канала погрешность параметризации превышает случайный шум измерения в 7 случаях (0,3%). Для канала 692 см⁻¹ погрешность оптимальной параметризации во всех случаях заведомо меньше шума измерения.

Полоса поглощения озона и область атмосферного окна прозрачности

Для области 790–1260 см⁻¹ в оптимальном разложении были использованы первые 40 собственных векторов. На рис. 1 можно видеть величины СКО оптимальной параметризации для этого участка спектра. Из рис. 1 следует, что величина СКО

превышает случайный шум измерения в целом ряде каналов, в окне прозрачности и в полосе поглощения озона. На рис. 3 (внизу) продемонстрирован «плохой» с точки зрения оптимальной параметризации канал из центра полосы поглощения озона ($1042,5 \text{ см}^{-1}$). Анализ представленной гистограммы показал, что для канала $1042,5 \text{ см}^{-1}$ при использовании в разложении 40 собственных векторов число реализаций, в которых погрешность параметризации превышает случайный шум измерения, составляет 29, т.е. 1,2% от общего числа реализаций в ансамбле. Для самого «плохого» канала из окна прозрачности ($887,25 \text{ см}^{-1}$) это число составляет 110 реализаций (4,8%). При этом в 6 случаях погрешность параметризации на порядок больше шума измерения. Погрешность оптимальной параметризации в наиболее типичных (средних) каналах полосы озона (1010 см^{-1}) и окна прозрачности ($1158,75 \text{ см}^{-1}$) превышает случайный шум измерения в 4 и 14 случаях соответственно.

Полосы поглощения метана, закиси азота и водяного пара

На рис. 1 также представлены величины СКО оптимальной параметризации спектрального хода излучения в полосах поглощения метана, закиси азота и водяного пара при использовании 30 собственных векторов. Отметим, что для полосы водяного пара $6,3 \text{ мкм}$ достаточно использовать первые 20 собственных векторов, чтобы погрешность оптимальной параметризации не превышала уровня случайного шума измерений для любой реализации. В канале 1283 см^{-1} (из полосы поглощения N_2O) погрешность параметризации максимальна, при этом в 37 случаях из 2311 (1,6%) она превышает случайный шум измерения. Для полосы поглощения метана самый «плохой» случай — канал $1304,25 \text{ см}^{-1}$. При этом погрешность оптимальной параметризации в этом канале превышает случайный шум измерения в 16 случаях, т.е. в 0,7% всех реализаций рассматриваемого ансамбля.

В табл. 2 приведены спектральные интервалы, используемые для восстановления того или иного параметра, число используемых векторов, а также максимальное количество (в %) «плохих» спектров, для которых погрешность параметризации превышает случайный шум измерения.

В качестве общего комментария к приведенным материалам отметим следующее. Возрастание погрешности при параметрическом представлении отдельных спектров объясняется «аномальными» особенностями спектрального хода в тех или иных полосах, которые, в свою очередь, индуцируются особенностями соответствующих реализаций атмосферных моделей из ансамбля TIGR. Независимый анализ показывает, к примеру, что вертикальные профили температуры над отдельными районами Китая имеют большие температурные инверсии в нижней тропосфере. Это порождает «аномальное» поведение спектров в полосе окна прозрачности и приводит к росту погрешности аппроксимации

при использовании алгоритмов МГК. В подобных ситуациях возрастание СКО может служить индикатором «нестандартного» состояния атмосферы, а соответствующие спектры должны быть подвергнуты дополнительному анализу.

Таблица 2

Число членов разложения по ЭОФ в оптимальной параметризации и количество спектров с повышенным уровнем СКО аппроксимации

Область спектра, см^{-1}	Определяемый параметр	Число собственных векторов (ЭОФ)	Количество неточно аппроксимруемых спектров, %
660–790	Температурный профиль	50	1,9
790–970, 1120–1260	Температура и коэффициент отражения поверхности	40	4,8
970–1120	Профиль озона	40	1,2
1260–1330	Профиль метана и N_2O	30	0,7 и 1,6
1330–1650	Профиль влажностного содержания	20	0

4. Основные результаты и выводы

Для анализа ансамбля рассчитанных спектров уходящего теплового излучения в области волновых чисел $660\text{--}2010 \text{ см}^{-1}$ (2311 реализаций), моделирующих глобальные измерения спутниковым прибором ИКФС-2, был использован метод главных компонент. Проанализирована информативность измерений уходящего теплового излучения в терминах объема информации по Козлову, числа степеней свободы, а также прироста информации по Шеннону. Расчеты были проведены для всей спектральной области измерений и для отдельных областей, используемых для восстановления различных параметров атмосферы и поверхности.

Наиболее информативной спектральной областью является атмосферное окно прозрачности — $790\text{--}1260 \text{ см}^{-1}$, по измерениям в которой можно определять до 70 независимых параметров атмосферы и поверхности. В области полосы поглощения углекислого газа ($660\text{--}790 \text{ см}^{-1}$) можно определять до 40 параметров, в области полос поглощения метана, закиси азота и водяного пара ($1260\text{--}1650 \text{ см}^{-1}$) — до 22. Во всей спектральной области ($660\text{--}2010 \text{ см}^{-1}$) в измерениях уходящего излучения присутствуют 106 независимых параметров.

Проанализирована точность оптимальной параметризации спектрального хода излучения, основанная на разложении излучения по собственным векторам спектральной ковариационной матрицы (ЭОФ). Показано, что для достижения точности, сравнимой со случайным шумом измерений, в большинстве случаев достаточно использовать первые 50 собственных векторов в разложении. При разбиении всей спектральной области на подобласти возможно уменьшение числа собственных векторов

в разложении. Так, в полосе поглощения углекислого газа необходимо использовать 50 собственных векторов, в окне прозрачности и полосе поглощения озона — 40 собственных векторов, в полосах поглощения метана и закиси азота — 30 векторов, в полосе поглощения водяного пара — 20 собственных векторов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 09-05-00797, а также Аналитической ведомственной целевой программы 1138 (АВЦП 1138) и 3846 (АВЦП 3846) Минобрнауки.

1. *Aumann H.H., Pagano R.J.* Atmospheric Infrared Sounder on the Earth Observing System // *Opt. Eng.* 1994. V. 33. P. 776–784.
2. *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.* D. 2002. V. 107. N 22. 4620, doi:10.1029/2001JD001591.
3. *Dudhia A., Jay V.L., Rodgers C.D.* Microwindow selection for high-spectral-resolution sounders // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 18. P. 3665–3673.
4. *Rodgers C.D.* Information content and optimisation of high spectral resolution remote measurements // *Adv. Space Res.* 1998. V. 21. N 3. P. 361–367.
5. *Обухов А.М.* О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // *Изв. АН СССР. Сер. Геофиз.* 1960. № 3. С. 432–439.
6. *Hung-Lung Huang, Antonelli P.* Application of Principal Component Analysis to High-Resolution Infrared Measurement Compression and Retrieval. // *J. Appl. Meteorol.* 2001. V. 40. N 3. P. 365–388.
7. *Aires F., Rossow W.B., Scott N.A., Chedin A.* Remote sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument. 1. Compression, denoising, and first-guess retrieval algorithms // *J. Geophys. Res.* D. 2002. V. 107. N 22. 4619, doi:10.1029/2001JD000955.
8. *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.
9. *Rodgers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and Practice. World Science Publishing. Co. Ltd. 2000. 237 p.
10. *Rodgers C.D.* Information Content and Optimization of high spectral resolution measurements // *Proc. SPIE.* 1996. V. 283. P. 136–147.
11. *Antonelly P., Revercomb H.E., Smorovsky L.A., Smith W.L., Knuteson R.O., Tobin D.C., Garcia R.K., Howell H.B., Huang H.-L., Best F.A.* A principal noise component filter for high spectral resolution infrared measurements // *Geophys. Res. D.* 2004. V. 109. Iss. 23. D. 23102, doi: 10.1029/2004JD004862.
12. *Goldberg M.D., Zhou L., Wolf W., Barnett C., Divakarla M.G.* Application of Principal Component Analysis (PCA) on AIRS data // *Proc. SPIE.* 2005. V. 5655 (SPIE, Bellingham, WA, 2005). P. 479–488.
13. *Рублев А.Н., Успенский А.Б., Троценко А.Н., Удалова Т.Ф., Волкова Е.В.* Детектирование и оценка балла облачности по данным атмосферных ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // *Исслед. Земли из космоса.* 2004. № 2. С. 43–51.
14. *Liu X., Smith W.L., Zhou D.K., Larar A.* Principal component-based radiative transfer model for hyperspectral sensors: theoretical concept // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. N 1. P. 201–209.
15. *Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г.* Бортовой Фурье-спектрометр для термического и влажностного зондирования атмосферы // III Международный конф.-выставка «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». г. Королев Московской области, 27–31 мая 2002 г.
16. *Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В., Козлов Д.А., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г., Травников Р.И., Романовский А.С., Архипов С.А., Целиков В.А.* Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли: Тр. Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 г. // *Сб. науч. статей.* 2009. Т. 1. Вып. 6. С. 259–266.
17. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Температурно-влажностное зондирование атмосферы // *Исслед. Земли из космоса.* 2009. № 5. С. 3–10.
18. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности использования данных спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 для дистанционного определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности. 2. Температура и излучательная способность поверхности суши // *Исслед. Земли из космоса.* 2010. (В печати).
19. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности использования данных спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 для дистанционного определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности. 3. Озон и малые газы составляющие // *Исслед. Земли из космоса.* 2010. (В печати).
20. *Chevallier F., Chedin A., Cheruy F., Morcrette J.J.* A TIGR-like atmospheric profile database for accurate radiative flux computation // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2000. V. 126. Iss. 563. P. 777–785.
21. *Козлов В.П.* Избранные труды по теории планирования эксперимента и обратным задачам оптического зондирования. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2000. 500 с.

Ya.A. Virolainen, Yu.M. Timofeyev, A.V. Polyakov, A.B. Uspensky. Optimal parameterization of outgoing thermal radiance spectra (satellite experiment with IKFS-2 spectrometer).

The ensemble of calculated spectra (2311 realizations), that simulate the global measurements of outgoing thermal radiance in 660–2100 cm⁻¹ spectral region by satellite spectrometer IKFS-2, has been analyzed in terms of informativeness (Kozlov information volume, degrees of freedom, Shannon information content). It has been shown that considered radiance measurements contain 106 independent parameters in the whole spectral range. The accuracy of the optimal parameterization of spectra based on spectral covariance matrix eigenvectors transformation has been analyzed. It has been shown that the use of first 20–50 eigenvectors in transformation is enough to minimize the parameterization error for the measurement noise level.