

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРА — ПОДСТИЛАЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ К СПЕКТРАЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ\*

А. А. СОКОЛОВ

*Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия*  
e-mail: saa@isa.ru, msaa@mail.ru

Г. А. ХОМЕНКО

*Университет Литораль Опалового Берега,  
Лаборатория ELICO CNRS, Франция*  
e-mail: khomenko@mren2.univ-littoral.fr

The inverse problem of remote atmospheric measurements from IR sounders above seas is considered with respect to retrieval of the humidity and the temperature profiles as well as the sea surface temperature. Sensitivity of the solutions to the forward and inverse problems arising from the frequency shifts of the measurement channels is analyzed for the IR-spectrometer AIRS. Several approaches based on filtering, calibration and appropriate choice of channels are proposed to reduce sensitivity of results to fluctuations of spectral frequencies.

## Введение

Современные системы прогноза погоды требуют усвоения большого числа измерений параметров атмосферы и подстилающей поверхности. В этой связи возникает задача восстановления профилей температуры и влажности атмосферы и температуры поверхности. Эта задача успешно решалась с 70-х годов, например, при помощи зондировщика TIROS-N [1], однако из-за постоянно возрастающих требований к точности и разрешению таких измерений наблюдается интенсивное развитие измерительной аппаратуры и методов решения соответствующих обратных задач.

Современные спектрометры, такие как Advanced InfraRed Spectrometer (AIRS), Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), Michelson Interferometer for Passive Atmospheric

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-64919).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2005.

Sounding (MIPAS), работающие в ИК-диапазоне, имеют множество измерительных каналов и высокое спектральное разрешение, что позволяет использовать их для эффективно-го решения широкого класса обратных задач. Недостатком таких приборов является то, что центры измерительных каналов прибора могут со временем несколько смещаться по частоте, что может привести к значительным ошибкам при решении прямой и обратной задач.

Целью работы является исследование зависимости величины ошибки прямой и обратной задач от смещения частоты измерений и поиск способов уменьшения этой ошибки.

В работе при помощи метода линейной редукции и вариационного метода решается обратная задача восстановления профилей температуры и влажности атмосферы, а также температуры поверхности по модельным спутниковым измерениям в ИК-диапазоне. Измерительные каналы выбраны в полосах поглощения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , при этом использовано 30 наиболее информативных каналов. Модельные спутниковые измерения прибора AIRS [2], который установлен на платформе американских спутников AQUA [3] и AURA, были случайным образом возмущены, таким способом была смоделирована ошибка прибора. В статье показывается, что сдвиг частоты приводит к значительному увеличению ошибки решения обратной задачи. Предлагаются способы учета возможности сдвига частоты, основанные на фильтрации измерительных каналов и правильной калибровке. Проведенные численные эксперименты иллюстрируют применимость рассматриваемых подходов для уменьшения ошибки решения обратной задачи.

## 1. Описание алгоритмов решения прямой и обратной задач

Используя уравнение переноса в предположении отсутствия рассеяния при условии термодинамического равновесия атмосферы, монохроматическое излучение с частотой  $\nu$ , проходящее на спутник на высоте  $h$  (над водной поверхностью) под углом  $\theta$ ,  $\mu = \cos \theta$ , можно записать в виде [4]

$$I_\nu(h, \mu > 0) = \varepsilon_\nu(\mu) B_\nu(T_0) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_0^h k_\nu(z'') dz''\right) + \\ + \int_0^h \frac{k_\nu}{\mu} B_\nu(z') \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_z^h k_\nu(z'') dz''\right) dz' + \\ + a_\nu(\mu) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_0^h k_\nu(z'') dz''\right) \times \int_{-1}^0 \mu' \int_h^0 \frac{k_\nu(z')}{\mu'} B_\nu(z') \exp\left(\frac{1}{\mu'} \int_z^0 k_\nu(z'') dz''\right) dz' d\mu', \quad (1)$$

где  $k_\nu(z)$  — коэффициент поглощения;  $a_\nu(\mu)$  — коэффициент отражения;  $\varepsilon_\nu(\mu')$  — излучательная способность поверхности;  $T_0$  — температура поверхности океана;  $B_\nu(T)$  — функция Планка [4].

Поскольку прибор на спутнике измеряет не монохроматическое излучение в заданном направлении, а поток и имеет некоторую спектральную характеристику  $\xi_i(\nu)$  и диаграмму направленности  $g_j(\mu)$ , сигнал, регистрируемый спутником на  $i$ -м измерительном канале в

$j$ -м направлении, может быть записан как

$$y_{ij} = \int_0^{\infty} d\nu \int_0^1 \xi_i(\nu) g_j(\mu) I_\nu(h, \mu) d\mu, \quad (2)$$

где  $I_\nu(h, \mu)$  определяется выражением (??). В численных экспериментах использовалась численная модель ИК-спектрометра AIRS. Коэффициент поглощения  $k_\nu(z)$  рассчитывался методом полинейного счета с использованием спектроскопической базы данных HITRAN [5]. Диаграмма направленности считалась  $\delta$ -функцией, а спектральная характеристика моделировалась гауссианом. Рассматривались надирные измерения.

Решалась задача восстановления профилей температуры и влажности атмосферы, а также температуры поверхности. Среди каналов AIRS было выбрано более 50 в полосах поглощения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и в окнах прозрачности, которые были отсортированы в порядке убывания информативности [6].

Для поиска наиболее информативных каналов, калибровки и верификации были использованы данные Европейского центра среднесрочного прогноза [7]: 500 реализаций для калибровки и 500 реализаций для верификации.

Одним из методов решения обратных задач, позволяющим учесть нелинейную связь между предиктором и предиктантом, является вариационный метод [8], основанный на минимизации штрафной функции

$$J(x) = \frac{1}{2} \left\{ (x_a - x)^T S_a^{-1} (x_a - x) + (y_m - y(x))^T S_m^{-1} (y_m - y(x)) \right\}, \quad (3)$$

где вектор неизвестных  $x$  размерности 23 включал в себя отклонения от стандартных значений профиля температуры и влажности атмосферы на 11 уровнях и температуры поверхности океана. Вектор измерений (предиктор)  $y_m$  моделировался соотношением (2), определяющим компоненты решения прямой задачи  $y(x)$ , на которое накладывался некоррелированный гауссов шум. Нормировочные множители  $S_a = E((x - x_a)(x - x_a)^T)$  и  $S_m = E((y_m - y(x_a))(y_m - y(x_a))^T)$  в выражении (3) учитывают ошибки априорной оценки и прямой задачи.

Поскольку успех минимизации в значительной степени зависит от выбора начального приближения, в качестве априорной оценки  $x_a$  восстанавливаемых параметров была использована линейная оценка, полученная методом редукции [9]:

$$x_a = R_{\text{red}} y_m, \quad R_{\text{red}} = S_x A^* (A S_x A^* + \Sigma_\nu)^{-1}. \quad (4)$$

Здесь  $A$  — линеаризованный оператор прямой задачи  $y = Ax + \nu$ ;  $\Sigma_\nu$  — автоковариационная матрица ошибки  $\nu$  такого представления;  $S_x$  — автоковариационная матрица предиктанта.

Эффективный поиск минимума штрафной функции (3) может быть осуществлен при помощи модифицированного метода Ньютона [10]. В этом случае строится итерационный процесс в виде последовательных приближений, в качестве первого приближения берется значение  $x_a$  (4).

## 2. Изучение чувствительности прямой задачи к сдвигам частоты

Современные ИК-спектрометры являются достаточно сложными приборами, проводящими измерения на основе интерференции проходящего излучения. Измерительные каналы



Рис. 1. Смещение по спектру каналов AIRS с ноября 2002 по февраль 2003 года.

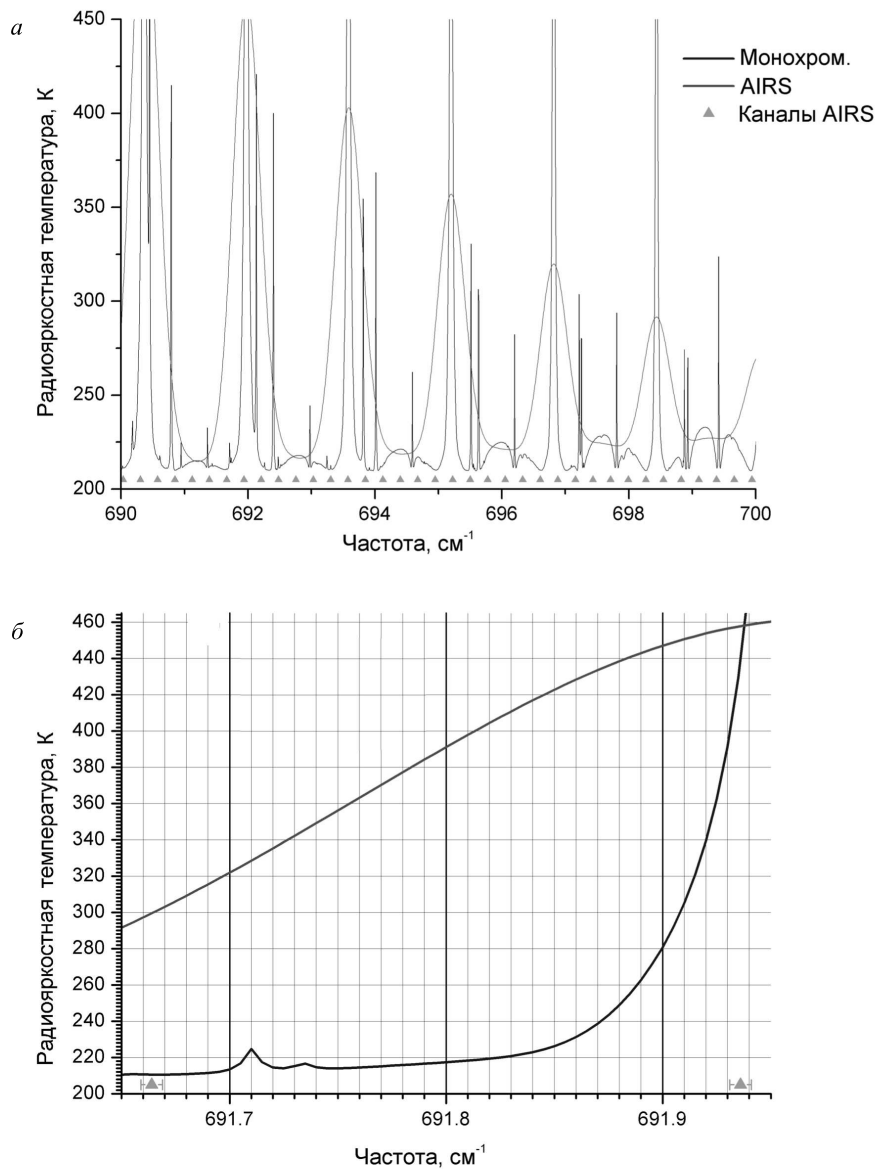


Рис. 2. Спектральный ход монохроматического и измеряемого AIRS сигнала и каналы AIRS: *a* — участок спектра  $690 \dots 700 \text{ см}^{-1}$ ; *б* — участок спектра  $691.65 \dots 691.95 \text{ см}^{-1}$

таких приборов могут со временем сдвигаться по спектру. На рис. 1 изображено суммарное смещение каналов AIRS с ноября 2002 по февраль 2003 года. Эта проблема усугубляется тем, что спектральная зависимость измеряемого сигнала является сильно осциллирующей функцией, поскольку ширина спектральной характеристики таких приборов сравнительно мала (порядка десятых обратного сантиметра) и измерения чувствительны к спектральному сдвигу. На рис. 2, *а* изображен спектральный ход измеряемого прибором AIRS излучения и монохроматического излучения, а также отмечены точки на спектре, где расположены каналы AIRS. Расчеты проведены при стандартных атмосферных условиях. По рис. 2, *б*, отображающему малый отрезок спектра, можно оценить величину изменения сигнала при сдвиге частоты для двух измерительных каналов на частотах 691.66 и 691.94  $\text{см}^{-1}$ . Видно, что, например, на частоте 691.94 измеряемое излучение может меняться более чем на градус радиояркостной температуры при сдвиге частоты на 0.005  $\text{см}^{-1}$ .

### 3. Чувствительность решения обратной задачи к сдвигам частоты

Обратная задача решалась методом линейной редукции, а также комбинированным методом, т. е. вариационным методом с начальным приближением, получаемым методом редукции. Восстанавливались температура поверхности океана  $T_0$  и высотные профили температуры  $T(z)$  и влажности атмосферы  $q(z)$ .

На основании калибровочного ансамбля вычислены необходимые статистические характеристики для решения обратной задачи. Смоделирована ситуация, представленная на рис. 1. Поскольку для данного численного эксперимента все чувствительные к сдвигу частоты каналы находятся в области 690 . . . 800  $\text{см}^{-1}$ , решено было сдвиг частоты взять равным  $-0.005 \text{ см}^{-1}$  для всех измерений. Точность восстановления методом редукции для температуры поверхности, профиля температуры и влажности упала соответственно с 0.82 и 2.03 К, 1.14 гр/кг до 0.83 и 2.86 К, 1.19 гр/кг. Для вариационного метода ошибка увеличилась с 0.4 и 1.94 К, 1.10 гр/кг до 0.38 и 3.53 К, 1.17 гр/кг. Видно, что вариационный метод (нелинейный) значительно более чувствителен к ошибкам сдвига частоты по сравнению с линейным методом редукции. Кроме того, точность восстановления температуры поверхности практически не уменьшилась при сдвиге по частоте, это может быть объяснено тем фактом, что основной источник информации о температуре поверхности — измерения в полосах пропускания, которые слабо зависят от сдвига частоты.

### 4. Учет возможности сдвига частот при решении обратной задачи

Первый подход при решении обратной задачи с учетом возможности сдвига частот — это выбор измерительных каналов, слабо зависящих от сдвига частоты. Например, из рис. 2, *б* видно, что спектральный канал на частоте 691.66 будет более чувствителен, чем канал на частоте 691.94. Однако при такой фильтрации каналов могут быть потеряны информативные компоненты предиктора.

Другой способ — учет при построении калибровочных множителей весовой функции (3) и оператора редукции (4) — дает возможность сдвига частоты. При вычислении данных

статистических характеристик частота может быть случайным образом возмущена. Этот метод, однако, не учитывает возможность изменения при сдвиге частоты оператора Якоби прямой задачи, который используется при решении обратной задачи.

## 5. Численные эксперименты

Результаты численных экспериментов сведены в таблицу. В первой колонке приведена точность решения обратной задачи при отсутствии сдвига по частоте, во второй дан результат решения обратной задачи со сдвинутой частотой, в третьей — результат решения обратной задачи, когда были исключены чувствительные к сдвигу частоты измерения. Видно, что точность решения значительно увеличилась, особенно для вариационного метода. В четвертой колонке приведены результаты, полученные с использованием всех измерительных каналов, однако калибровка учитывает возможность сдвига частоты. Данный метод также в значительной степени увеличивает точность восстановления. Наконец, в пятой колонке приведен результат численного эксперимента при использовании фильтрации каналов, учитывающей сдвиг частот калибровки. Получившийся результат практически совпадает с ошибками решения невозмущенной задачи. Это означает, что увеличение ошибки вследствие исключения некоторых каналов небольшое.

Ошибки восстановления

Метод	Параметр	Без сдвига по частоте, все каналы	Сдвиг без калибровки, все каналы	Сдвиг без калибровки, нечувств. каналы	Сдвиг с калибровкой, все каналы	Сдвиг с калибровкой, нечувств. каналы
Линейная редукция	$\varepsilon_{T_0}$ , К	0.82	0.83	0.83	0.81	0.81
	$\varepsilon_{T(z)}$ , К	2.03	2.86	2.09	2.07	2.03
	$\varepsilon_{q(z)}$ , гр/кг	1.14	1.19	1.18	1.15	1.13
Вариационный	$\varepsilon_{T_0}$ , К	0.40	0.38	0.42	0.40	0.41
	$\varepsilon_{T(z)}$ , К	1.94	3.53	2.03	2.03	1.95
	$\varepsilon_{q(z)}$ , гр/кг	1.10	1.17	1.13	1.14	1.10

## Заключение

Проблема чувствительности решения обратной задачи к спектральной стабильности измерительных каналов проявляется в большей степени при использовании вариационного (нелинейного) метода по сравнению с методом линейной редукции. Особенно высокая чувствительность наблюдается при восстановлении профиля температуры. Предложенные методики позволяют значительно снизить чувствительность решения обратной задачи восстановления температуры поверхности, а также профилей температуры и влажности к сдвигу частоты каналов измерений.

Авторы благодарят А.И. Чавро за ценные советы и замечания, высказанные при обсуждении данной работы.

## Список литературы

- [1] SMITH W.L., WOOLF H.M., HAYDEN C.M. ET AL. The TIROS-N operational vertical sounder // Bulletin Amer. Meteorological Society. 1979. N 58. Oct.
- [2] AUMANN H.H., COAUTHORS AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41. P. 253–264.
- [3] PARKINSON C.L. Aqua: An earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41, N 2. P. 173–182.
- [4] LIOU K.N. An introduction to atmospheric radiation. Second edition // Intern. Geophys. Ser. 2002. Vol. 84.
- [5] ROTHMAN L.S., BARBE A., BENNER D.C. ET AL. The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2003. Vol. 82. P. 5–44.
- [6] ЧАВРО А.И., ДМИТРИЕВ Е.В. Статистическая модель восстановления региональной структуры геофизических полей // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 39–49.
- [7] CHEVALLIER F. Sampled Database of 60-level Atmospheric Profiles from the ECMWF Analyses. EUMETSAT/ECMWF, SAF-Programme. Research Report N 4. 2001.
- [8] TALAGRAND O. Assimilation of observations, an introduction // J. of Meteorological Society of Japan. 1997. Vol. 75, N 1B. P. 191–209.
- [9] ПЫТЬЕВ Ю.П. Математические методы интерпретации эксперимента. М.: Высш. шк., 1989. 315 с.
- [10] MARCHUK G.I., CHAVRO A.I. On the statement and solution of inverse problems in solution of inverse problems in satellite meteorology // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 1998. Vol. 13, N 6. P. 501–515.

*Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.*