

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТОЧНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ К ВЕЛИЧИНЕ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ИК-РАДИОМЕТРОВ*

А. А. Соколов

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

e-mail: saa@isa.ru

In this work the main radiation transfer processes at the atmosphere were taken into account in the numerical experiments. The altitude dependence of the derivatives of the parameters to retrieve is studied for a number of channels (Jacobean), which defines the sensitivity of retrievals to measurements. Then simulations of the instruments were applied to explore the retrievals accuracy sensitivity to the spectral resolution.

Введение

Современные спектрометры — AIRS (Atmospheric IR Sounder), IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding), работающие в ИК-диапазоне, имеют множество измерительных каналов и высокое спектральное разрешение. Однако при повышении разрешения значительно убывает отношение сигнал/шум, что отрицательно сказывается на точности решения обратной задачи восстановления характеристик атмосфера — подстилающая поверхность. Целью данной работы является исследование чувствительности решения обратной задачи к величине спектрального разрешения прибора при фиксированных ошибках измерения.

В работе при помощи вариационного метода решается обратная задача восстановления профилей температуры и влажности атмосферы, а также температуры поверхности земли по модельным спутниковым измерениям в ИК-диапазоне. Измерительные каналы выбраны в полосах поглощения CO_2 и H_2O , при этом использовано 60 фиксированных информативных каналов. Проведенные численные эксперименты иллюстрируют ход ошибки восстановления приземной температуры, а также профилей температуры и влажности атмосферы в зависимости от спектрального разрешения.

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

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

1. Описание алгоритмов решения прямой и обратной задач

С помощью уравнения переноса в предположении отсутствия рассеяния при условии термодинамического равновесия атмосферы монохроматическое излучение с частотой ν , проходящее на спутник на высоте h (над водной поверхностью) под углом θ , $\mu = \cos \theta$, может быть описано в виде [1]

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

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 [1].

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 (1).

В численных экспериментах использовалась численная модель ИК-спектрометра AIRS, которая модифицировалась для различных значений спектрального разрешения. Коэффициент поглощения $k_\nu(z)$ рассчитывался методом полинейного счета с использованием спектроскопической базы данных HITRAN [2]. Диаграмма направленности считалась δ -функцией, а спектральные характеристики моделировалась гауссианом с различной шириной. Рассматривались надирные измерения. Решалась задача восстановления профилей температуры и влажности атмосферы, а также температуры поверхности. Из каналов AIRS выбрано более 50 в полосах поглощения CO_2 и H_2O и в окнах прозрачности. Для калибровки и верификации использованы данные Европейского центра среднесрочного прогноза [3] — 500 реализаций для калибровки и 500 реализаций для верификации.

Одним из методов решения обратных задач, позволяющих учесть нелинейную связь между предиктором и предиктантом, является вариационный [4], 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 использована линейная оценка, полученная методом редукции [5, 6]:

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

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

Эффективный поиск минимума штрафной функции (3) может быть осуществлен при помощи модифицированного метода Ньютона [7]. В этом случае итерационный процесс строится в виде последовательных приближений, в качестве первого приближения берется значение x_a (4).

2. Высотный ход элементов матрицы Якоби при различном разрешении

На рис. 1 и 2 изображен высотный ход элементов матрицы Якоби, рассчитанных для спектральной ширины прибора 0.3 обратных сантиметра, показывающих, о каких слоях атмосферы какие спектральные каналы несут информацию. Видно, что имеется недостаток информации о температуре самых нижних (приземных) слоев атмосферы и наиболее верхних слоев. Интересно, что имеются каналы с отрицательной обратной связью по температуре, т. е. при подогревании некоторых слоев прибор регистрирует меньшее излучение.

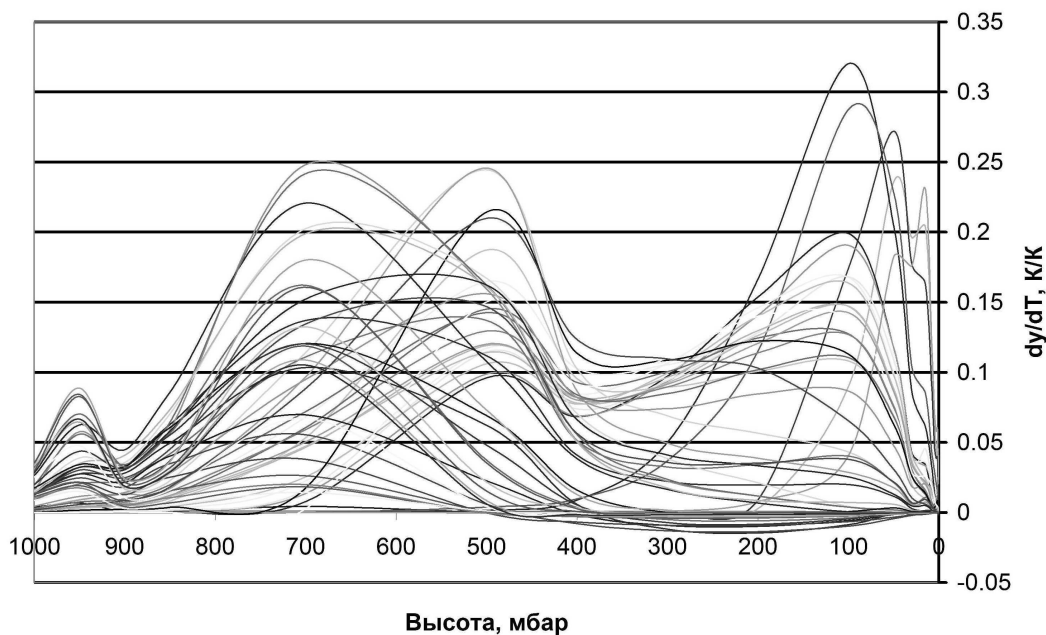


Рис. 1. Высотный ход температурных элементов матрицы Якоби для различных каналов.

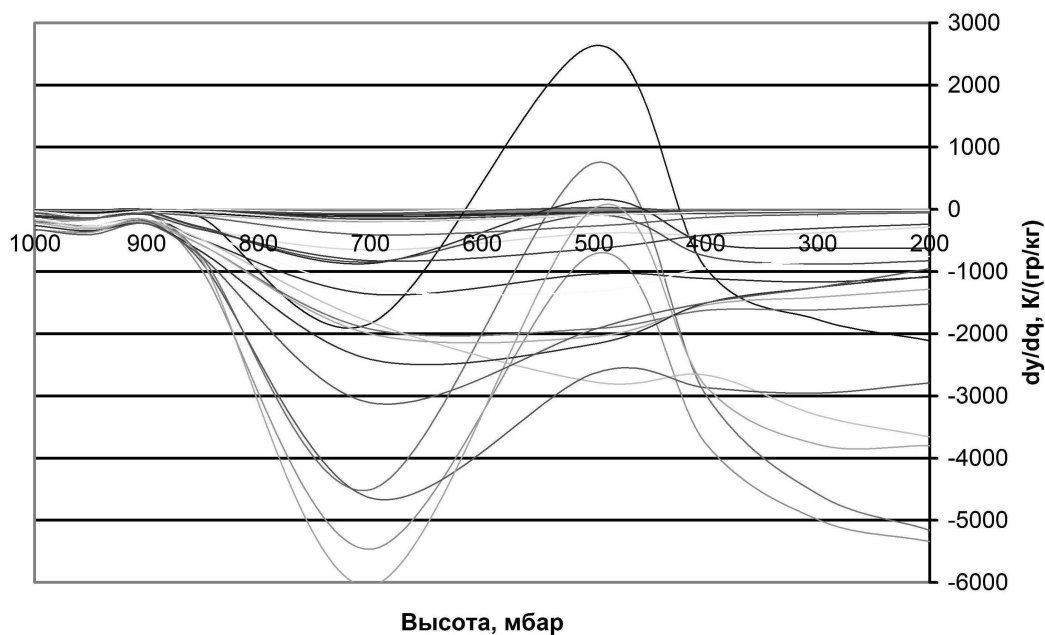


Рис. 2. Высотный ход влажностных элементов матрицы Якоби для различных каналов.

На рис. 3 и 4 изображен пример высотного хода температурных и влажностных элементов матрицы Якоби для приборов с различной спектральной шириной. Видно, что большему спектральному разрешению соответствует температурный якобиан, более локализованный по высоте (см. рис. 3). Для влажностного якобиана такая локализация наблюдается в значительно меньшей степени.

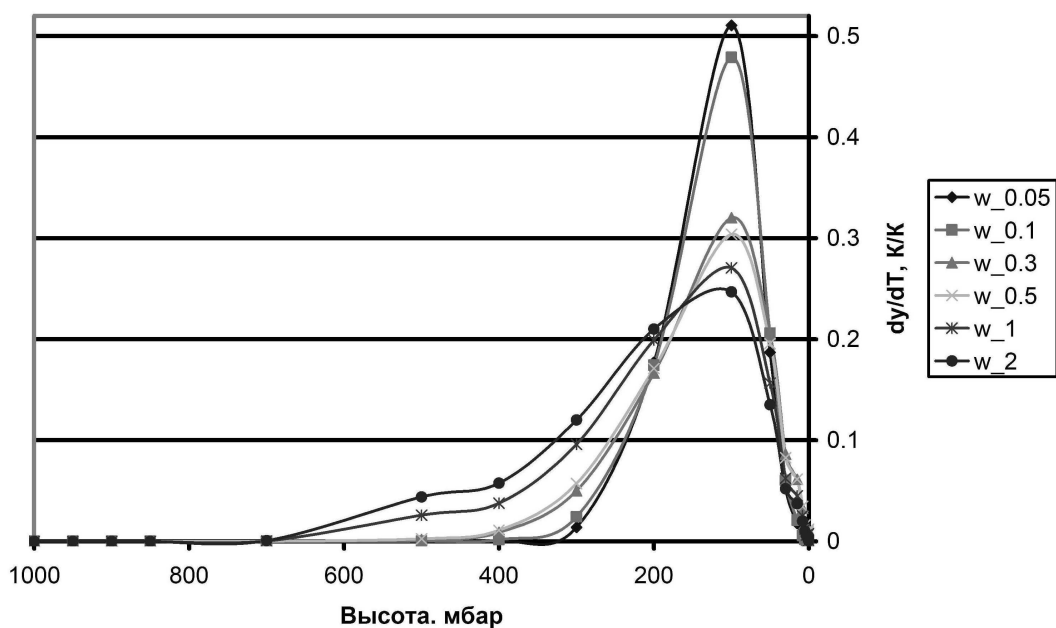


Рис. 3. Высотный ход температурных элементов матрицы Якоби для измерения на 700.22 обр. см для измерительных систем с разной спектральной шириной.

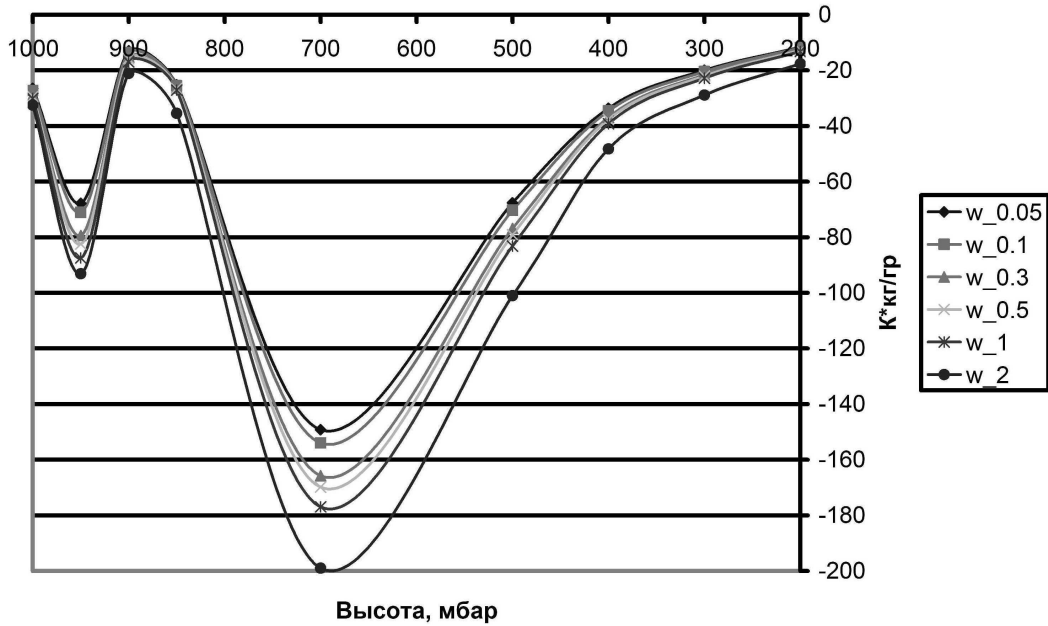


Рис. 4. Высотный ход влажностных элементов матрицы Якоби для измерения на 766.2 обр. см для измерительных систем с разной спектральной шириной.

Элементы матрицы Якоби, соответствующие другим каналам, ведут себя подобным образом. Таким образом, при увеличении разрешения следует ожидать повышения точности измерений, в первую очередь температурного зондирования.

3. Исследование чувствительности обратной задачи

Проведена серия численных экспериментов по восстановлению температуры поверхности океана и атмосферных профилей температуры и влажности для значений спектрального

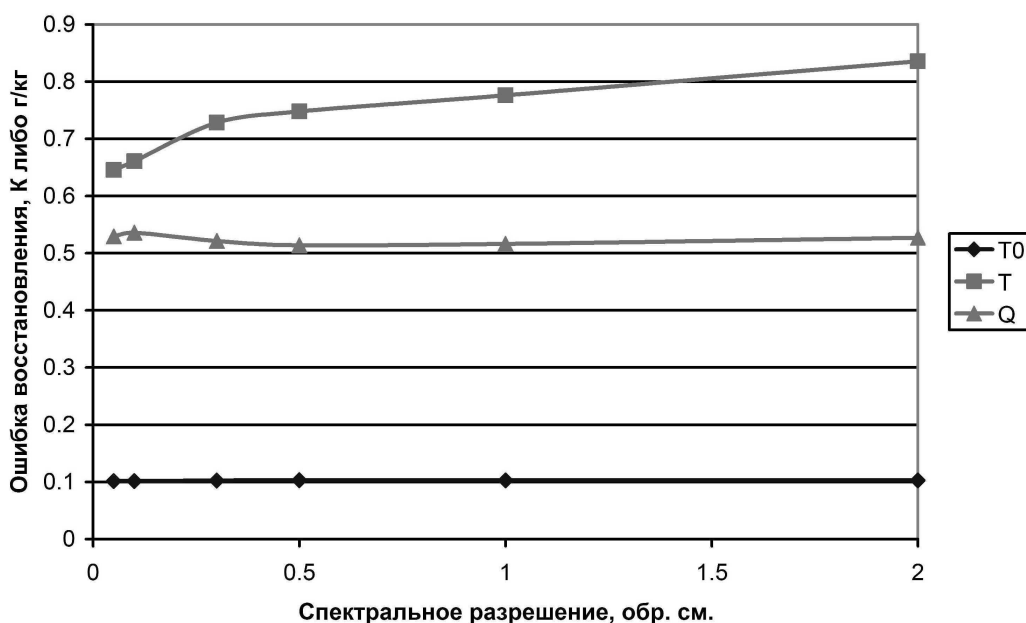


Рис. 5. Зависимость ошибки восстановления от спектрального разрешения.

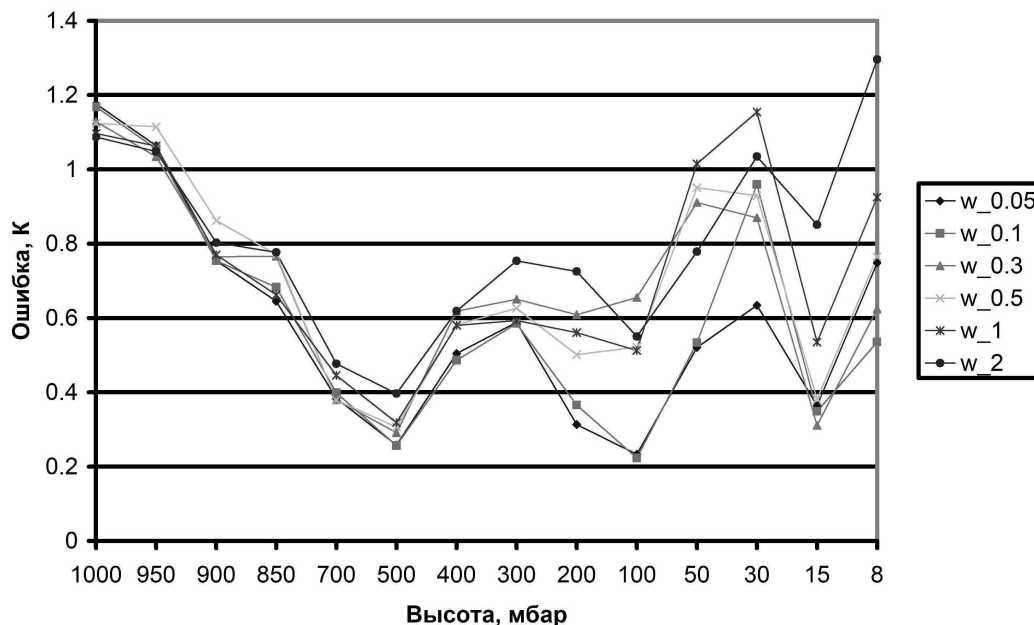


Рис. 6. Зависимость ошибки восстановления профиля температуры для приборов с различным спектральным разрешением.

разрешения (ширина на половине максимума), равного 2.0, 1.0, 0.5, 0.3, 0.1 и 0.05 обр. см. Результирующие среднеквадратичные ошибки восстановления приведены на рис. 5. Видно, что при зондировании температуры водной поверхности выигрыша при увеличении разрешения нет. Это может быть объяснено тем, что информация о свойствах поверхности приходит из участков спектра с малым количеством линий поглощения, т. е. из окон прозрачности, где измерения мало зависят от величины спектрального разрешения.

Точность восстановления профиля влажности в данном численном эксперименте оказалась практически не зависящей от спектрального разрешения. Возможным объяснением является то, что значительную информацию о профиле влажности несет в себе континуальное поглощение водяного пара, мало зависящее от спектрального разрешения. При температурном зондировании атмосферы наблюдается значительное увеличение точности при возрастании разрешения, которое может достигать 0.1 К при удвоении спектрального разрешения. Высотный ход среднеквадратичных ошибок измерения температуры приведен на рис. 6. Видно, что наибольшее увеличение точности наблюдается для верхних слоев атмосферы.

Заключение

Высотный ход элементов матрицы Якоби, соответствующий прибору с большим спектральным разрешением, сильнее локализован по высоте, что позволяет получать более детальную информацию о восстанавливаемых характеристиках.

Задача восстановления температуры водной поверхности и профиля влажности атмосферы по ИК-измерениям оказалась нечувствительной к спектральному разрешению измерительной системы.

В задаче восстановления профиля температуры атмосферы точность значительно возрастает при увеличении спектрального разрешения. Среднеквадратичная ошибка уменьшается на значение порядка 0.1 К при удвоении спектрального разрешения. Особенно заметно увеличение точности температурного зондирования верхних слоев атмосферы.

Список литературы

- [1] LIU K.N. An introduction to atmospheric radiation. Second Edition // Intern. Geophys. Series. 2002. Vol. 84. 583 p.
- [2] ROTHMAN L.S., BARBE A., BENNER 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.
- [3] CHEVALLIER F., CHEDIN A., CHERUY F., MORCRETTE J. TIGR-like atmospheric-profile databases for accurate radiativeflux computation // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2000. Vol. 126. P. 77–85.
- [4] TALAGRAND O. Assimilation of observations, an introduction // J. of Meteorolog. Society of Japan. 1997. Vol. 75, N 1B. P. 191–209.
- [5] ПЫТЬЕВ Ю.П. Математические методы интерпретации эксперимента. М.: Высш. шк., 1989. 315 с.
- [6] ЧАВРО А.И., ДМИТРИЕВ Е.В. Статистическая модель восстановления региональной структуры геофизических полей // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 39–49.
- [7] 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 19 октября 2006 г.