Гидрометеорология и экология
№ 1-2 2001

УДК 528.88(15), 528.85/.87(15)

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И УДЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

Академик АН РК У.М. Султангазин
Канд. геогр. наук А.Х. Ахмеджанов

Рассматриваются вопросы использования данных дистанционного зондирования из космоса в определении распределений метеорологических параметров в атмосфере. На основе решения обратной задачи предлагаются методы восстановления вертикальных профилей температуры и удельной влажности.

Глобальные данные распределения метеорологических элементов очень важны для задач прогноза погоды и решения ряда прикладных задач спутниковой метеорологии. В решении этих проблем могут быть использованы данные дистанционного зондирования в виде спектрального распределения уходящего теплового излучения, фиксируемого ИСЗ.

Общая постановка задач дистанционного зондирования метеорологических параметров с ИСЗ в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного (ИК) излучения с использованием теории сопряженных уравнений и уравнений ценности информации сформулирована в [6]. Различным задачам восстановления температурного поля при взаимодействии земной поверхности и атмосферы со спутников в ИК диапазоне спектра посвящено достаточно много работ[1 – 5, 8 - 12].

В настоящей работе поставлена задача построения численной модели восстановления вертикальных профилей температуры и удельный влажности с учётом поглощения теплового излучения водяным паром, имеющимся в атмосфере.

Уходящее излучение земли генерируется в различных слоях земной атмосферы и тем самым отражает термический режим этих слоёв или концентрацию водяного пара в них. Измеряемое спутниками тепловое излучение, есть сумма всех излучений элементарных слоёв атмосферы, характеризующееся функцией ослабления теплового излучения $\Phi_{\nu\mu}$, зависящая от вертикального профиля удельной влажности $q(p)$, давления P и

температуры $T(p)$, а также от длины волны λ (или частоты ν), на котором фиксируется излучение, и угла визирования ϑ.

Интегральная форма уравнения переноса инфракрасного или микроволнового излучения является основным соотношением, которое позволяет связать интенсивность излучения, измеряемую с ИСЗ, с вертикальным распределением температуры в атмосфере. Для уходящего теплового излучения $J_{\nu,\mu}$ на верхней границе атмосферы уравнение переноса в изобарической системе координат записывается в следующем виде [2]:

$$J_{\lambda,\mu} = B_\lambda[T(p_0)]\Phi_{\lambda,\mu}[p_0, q(p_0), T(p_0)] + \int_0^{p_0} B_\lambda[T(p)]\frac{\partial \Phi_{\lambda,\mu}[p, q(p), T(p)]}{\partial p}dp, \quad (1)$$

где $B_\lambda\,[T(p)]$ – функция Планка, $\Phi_{\lambda,\mu} = exp\left(-\frac{1}{\mu}\tau_\lambda\right)$ – функция ослабления теплового излучения в атмосфере, τ_λ - оптическая толщина атмосферы, $\mu = cos\,\vartheta$.

Интенсивность теплового излучения $J_{\lambda,\mu}$ является сложной функцией, зависящей от профиля температуры $T(p)$ и распределения поглощающих веществ (водяной пар, углекислый газ, водные капли и аэрозоль). Для простоты в этой задаче учитывается только водяной пар. Функционал (1) зависит от оптических характеристик в различных спектральных интервалах (λ - длина волны) и различных углах визирования (ϑ - угол визирования со спутника).

Оптическая толщина атмосферного слоя воздуха, заключенного между уровнем p_0 и p, в изобарической системе координат определяется соотношением

$$\tau_\lambda(p) = \int_0^p \alpha_\lambda(t)dt, \quad (2)$$

где $\alpha_\lambda(t)$ - функция поглощения теплового излучения в атмосфере. Функция поглощения $\alpha_\lambda(p)$ излучения находящимся в атмосфере водяным паром может быть представлена в виде

$$\alpha_\lambda(p) = k_\lambda(p)\rho(p), \quad (3)$$

$$k_\lambda(p) = k_\lambda^0 e(p), \quad (4)$$

где $k_\lambda(p)$ - коэффициент поглощения водяного пара на единицу плотности пара, $\rho(p)$ - плотность водяного пара в атмосфере, $e(p)$ - парциальное

давление водяного пара. Для выбранных ранее длин волн $k^0_{10,0} = 0{,}008$; $k^0_{10,5} = 0{,}010$; $k^0_{12} = 0{,}0135$. Для численного моделирования профиль плотности пара удобнее заменить профилем удельной влажности $q(p)$, тогда можно записать в виде

$$q(p) = 622\frac{e(p)}{p}, \tag{5}$$

где $e(p)$ - парциальное давление пара (гПа).

Тогда (5) запишется в виде:

$$k_\lambda(p) = k^0_\lambda \frac{q(p)}{622} p, \tag{6}$$

а (2) будет выглядеть в виде:

$$\tau_\lambda = \int_{p_0}^{p} \frac{k_\lambda q(p)}{622} dp \tag{7}$$

Функция ослабления излучения может быть представлена как:

$$\Phi_{\lambda,\mu}(p) = exp\left(-\frac{1}{\mu}\int_0^p \frac{k_\lambda q(p)}{622}\right)dp \tag{8}$$

Для решения уравнения (1) предположим, что при температуре $T(p_0)$ земная поверхность излучает как черное тело. Тогда интенсивность уходящего излучения регистрируемого со спутника в направлении $\mu = cos\,\vartheta$, связана с искомой функцией $T(p)$ - согласно (1).

Задача восстановления вертикального профиля температуры в атмосфере сводится к решению этого интегрального уравнения типа Фредгольма первого рода.

Уравнение (1) является нелинейным относительно искомого профиля температуры $T(p)$. Уравнения такого типа являются некорректными, так как для них не выполняется условие непрерывной зависимости решения от данных задач. Это означает, что бесконечно малым отклонениям $J_{\lambda,\nu}$ могут соответствовать достаточно большие значения искомой функции $T(p)$. Поэтому при решении таких задач традиционные численные методы не давали нужного результата.

Указанные трудности были преодолены подходом, разработанным М.С. Малкевичем. В нем использовались статистические методы в решении задач восстановления температурного профиля. Такую аппроксимацию могут

обеспечить ортогональные функции, теория которых была разработана А.М. Обуховым, если $T(p)$ представить в виде:

$$T(p)=\overline{T}(p)+T'(p),\ J_{\lambda,\mu}=\overline{J}_{\lambda,\mu}+J'_{\lambda,\mu},$$

где $T'(p)$ и $J'_{\lambda,\mu}$ - случайные отклонения от средних профилей $\overline{T}(p)$ и среднего значения $\overline{J}_{\lambda,\mu}$. Средний профиль температуры можно считать известным по многолетним климатологическим данным, а среднее значение $J_{\lambda,\mu}$ может быть определено из анализа космической информации. Тогда уравнение (1) перепишется в виде:

$$J'_{\lambda,\mu}=\frac{\partial B_\lambda(\overline{T}(p_0))}{\partial T}\Phi_{\lambda,\mu}(q(p_0))T'(p_0)-\int_0^{p_0}\frac{\partial B_\lambda(\overline{T}(p))}{\partial T}T'(p)d\Phi_{\lambda,\mu}(q(p_0)). \qquad (9)$$

Оптимальная аппроксимация случайной функции $T'(p)$ осуществляется системой ортогональных функций. Примером ортогональных функций является ряд Фурье, поэтому $T'(p)$ можно представить в форме

$$T'(p)=\frac{2}{p_0}\sum_{i=1}^{9}a_i\cos\frac{\pi(i-1)}{p_0}p. \qquad (10)$$

Допустим, что измерения на спутнике проводятся на тех длинах волн λ_1 = 10,0; λ_2 = 10,5; λ_3 = 12,0 мкм (или частотах ν_1 = 1000 см$^{-1}$; ν_2 = 950 см$^{-1}$; ν_3 = 833 см$^{-1}$) и трёх углах визирования по отношению к надиру ϑ = 24,6°; 44,4° и 54,0°. Эти данные дают возможность получения системы уравнений из девяти соотношений на основе (1), если подставить (10) в (9) для определения a_i, которая решается методом Гаусса. Здесь необходимо отметить, что именно подход Малкевича дает возможность получения решения плохо обусловленной задачи. Результаты счета показаны на рис.1а, на котором приведены восстановленные профили вертикального распределения температуры при отклонении измеряемого на ИСЗ теплового излучения Земли на 10% от среднего теплового излучения, равной 0,3 *кал·см$^{-2}$·мин* (209,4 *Вт·м$^{-2}$*) [7]. Стандартный профиль температуры был взят из [2]. Отклонения температуры, согласно рис. 1а, наблюдаются на поверхности Земли и на высоте от 750 до 650 гПа. Отклонения на земной поверхности можно объяснить дополнительным нагревом, а на указанных высотах - влиянием перераспределения удельной влажности, благодаря которой на этих высотах может образовываться облачность.

Представим значения влажности q в виде $q=\overline{q}+q'$, где $\overline{q}$ - средний климатический профиль влажности, q' - искомый профиль отклонений.

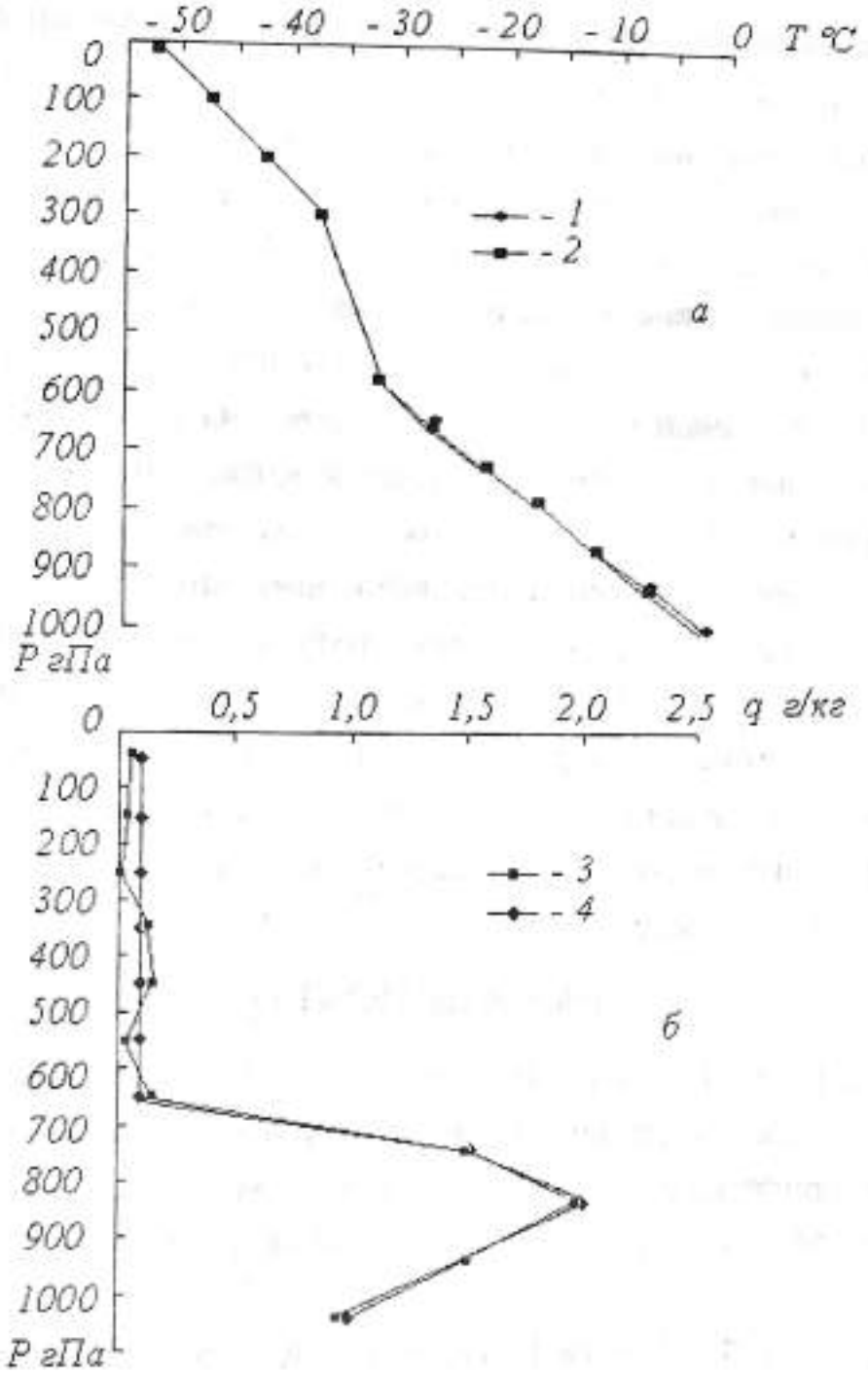

Рис.1 Распределение по высоте отклонений температуры (1) и удельной влажности (3) от базовых их значений (2, 4) при 10% отклонении значения уходящего теплового излучения.

Оптическая толщина τ_λ атмосферы, связанная с влажность выражением (7), также может быть записана в виде $\tau_\lambda = \bar{\tau}_\lambda + \tau'_\lambda$. Тогда функцию ослабления согласно (8) можно записать в виде

$$\Phi_{\lambda,\mu} = \left(1 - \frac{\tau'_\lambda}{\mu}\right) exp\left(-\frac{\bar{\tau}_\lambda}{\mu}\right), \qquad (11)$$

где первый сомножитель есть два первых члена разложения в ряд Тейлора для экспоненциальной функции при малых $\tau' << \bar{\tau}$.

Подставляя искомую функцию отклонения влажности q' в виде ряда (10) в (7) можем определить отклонение оптической толщины атмосферы. Используя выражение для функции ослабления (11) и значение 10% отклонения интенсивности теплового излучения при вышеуказанных длинах волн и углах визирования с помощью функционала (1) можно получить систему из девяти уравнений, которая решается так же, как и при восстановлении профиля температуры. Базовый профиль удельной влажности был взят из [2]. Полученный результат представлен на рис.1б. На графике наблюдается небольшое уменьшение значение влажности при 10 % увеличении фиксируемого теплового излучения на искусственном спутнике Земли.

Существенное значение при вычислительных процедурах восстановления вертикальных профилей температуры и влажностей имеют знания их стандартных профилей, а также точность измерении уходящего излучения, состояние атмосферы и алгоритм решения обратной задачи. Для решений этих задач на конкретной территории необходимо создание банка данных дистанционного зондирования, анализ значений фиксируемых излучений, определение средних многолетних данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Ю.А., Плахов И.Н., Репин И.А. Радиационные потоки у поверхности земли по данным измерений и численного моделирования // Метеорология и Гидрология. – 1999. - №7. – С. 14 - 21.
2. Герман М.А. Спутниковая метеорология. Л.: Гидрометиздат. 1975. – 367 с.
3. Кнуренко А.Б., Пытьев Ю.П., Чавро А.И. Метод редукции измерений в задаче определения ТПО при дистанционном зондировании в ИК – диапазоне спектра // Исследование Земли из космоса. – 1991. №6. - С. 26 - 34.
4. Козлов В.П. О восстановлении высотного профиля температуры по спектру уходящей радиации // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. -1966. - Т. II. - №2. -С. 137 - 148.
5. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. - М.: Наука, 1973. – 304 с.
6. Марчук Г.И. Уравнение для ценности информации с метеорологических спутников и постановка обратных задач // Космические исследования. – 1964. - Т.П.-3. - С. 462 - 477.
7. Матвеев Л. Т Физика атмосферы Л.: Гидрометиздат. 1976. – 639 с.

8. Покровский О.М. Оптимизация метеорологического зондирования атмосферы со спутников. - Л.: Гидрометеоиздат. 1984. – 264 с.
9. Чавро Ф.И. Физические основы и методы определения температуры поверхности океана со спутников. - М.: ОВМ АН СССР, 1990. – 174 с.
10. Arking A. Absorption of solar energy in the atmosphere: Discrepancy between model and observation. – Science. – 1996. - vol. 273. - P. 779 – 782.
11. Atwater M. A. The radiation model. – USA, Hartford, Connecticut, Center for the Environment and Man, 1974. - Sect.4. - vol.1. - CEM Rep. №. 5131 – 4099. - P. 67 - 82.
12. Charlock T., Rose F., et al. Retrievals of the surface and atmospheric radiation budget: Tuning parameters with radiative transfer to balance pixel-scale ERBE data. – 8th Conf. On Atmospheric Radiation, AMS, Jan. 1994. – Nashville. - P. 435 - 437.

Институт космических исследований

ҒАРЫШТАН ДИСТАНЦИЯЛЫҚ СҰҢҒІЛЕУ МӘЛІМЕТТЕРІ БОЙЫНША ТЕМПЕРАТУРАНЫҢ ВЕРТИКАЛДЫ ПРОФИЛЬДЕРІН ЖӘНЕ МЕНШІКТІ ЫЛҒАЛДЫЛЫҚТЫ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДІҢ САНДЫҚ ӘДІСТЕРІ

ҚРҒА академигі У.М. Сұлтанғазин
Геогр. ғылымд. канд А.Х. Ахмеджанов

Атмосферадағы метеорологиялық параметрлердің бөлінуін анықтаудағы ғарыштан дистанциялық сұңғілеу мәліметтерін пайдалану мәселелері қарастырылған. Кері есепті шешу негізінде температураның вертикалды профильдерін және меншікті ылғалдылықты қалпына келтірудің сандық әдістері ұсынылған.