

МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В работе предложен алгоритм построения системы наблюдений в задаче интерпретации результатов дистанционного зондирования, в основе которого лежит решение сопряженной задачи. Отмечены преимущества этого подхода, приведены конкретные примеры реализации предложенного алгоритма и результаты сравнения с данными, полученными на основе других моделей наблюдений.

Системы интерпретации данных дистанционного зондирования должны строиться на основе моделей исследуемого процесса и моделей косвенных наблюдений. Совместное использование этих моделей в рамках единого алгоритма способствует извлечению максимальной информации о состоянии атмосферно-оптического канала, а также указывает пути совершенствования наблюдательных систем с учетом физических особенностей изучаемого процесса.

В настоящей работе сделана попытка построения модели наблюдений на примере конкретной системы интерпретации результатов дистанционного зондирования, разрабатываемой в ИОА СО АН СССР с использованием данных многоканального радиометра высокого разрешения (AVHRR) [1]. Для построения модели наблюдений используется аппарат сопряженных функций, позволяющий достаточно эффективно описать структуру измерений в рамках заданной физической модели исследуемого процесса [2]. Модель наблюдений будем строить, используя в качестве примера первый канал AVHRR, работающий в видимом диапазоне спектра (0,73 мкм). Процесс переноса коротковолновой радиации в плоско-параллельной атмосфере может быть описан с помощью уравнения

$$\mu \frac{dI_{\lambda}(\mu, \tau)}{d\tau} + I_{\lambda}(\mu, \tau) = \sum_{k=1}^K F_{k\lambda}(\mu, \tau), \quad (1)$$

где $\mu = \cos\Theta$ (Θ — азимутальный угол, отсчитываемый от местной вертикали) с областью значений $M = \{0 < \mu \leq 1\}$; τ — оптическая толщина; $I_{\lambda}(\mu, \tau)$ — интенсивность переносимого излучения с длиной волны λ ; $F_{k\lambda}(\mu, \tau)$ — функция, описывающая структуру и интенсивность k -го источника излучения. Система интерпретации данных строится для элемента разрешения (пиксела) либо свободного от облачности, либо полностью или частично покрытого облаками.

Для того чтобы показать возможности предлагаемого алгоритма, воспользуемся некоторыми упрощающими предположениями. Будем считать, что:

а) радиация, поступающая от любой точки, лежащей в пределах поля зрения прибора с плоской приемной поверхностью (сканера) рассматривается как приходящая от некоторой горизонтально-однородной поверхности;

б) подстилающая поверхность для безоблачной части поля зрения сканера, а также расположенная под облачным слоем однородна и характеризуется изотропным отражением;

в) рассматривается случай однократного рассеяния.

Данные предположения, не ограничивая общности излагаемого алгоритма, позволяют более наглядно (в аналитическом виде) получить окончательный результат.

При этих предположениях уравнение (1) и соответствующие граничные условия можно записать для безоблачной части пиксела в виде

$$\mu \frac{d\bar{I}_{\lambda}(\mu, \tau)}{d\tau} + \bar{I}_{\lambda}(\mu, \tau) = \frac{S_{\lambda}}{4\pi} \bar{\gamma} e^{-\frac{1}{\mu_0} \tau}; \quad (2a)$$

$$\bar{I}(\mu, \tau_n) = (1 - n) \mu_0 \frac{S_{\lambda}}{\pi} \bar{R}_{\lambda} e^{-\frac{1}{\mu_0} \tau_n}, \quad \text{при } \mu > 0; \quad (26)$$

для облачной части пиксела в виде

$$\mu \frac{d\tilde{I}_{\lambda}(\mu, \tau)}{d\tau} + \tilde{I}_{\lambda}(\mu, \tau) = \frac{S_{\lambda}}{4\pi} \tilde{\gamma} e^{-\frac{1}{\mu_0} \tau}; \quad (3a)$$

$$\tilde{I}(\mu, \tilde{\tau}_n) = n\mu_0 \frac{S_\lambda}{\pi} \tilde{R}_\lambda e^{-\frac{1}{\mu_0} \tilde{\tau}_n} \text{ при } \mu > 0, \quad (36)$$

где \bar{I}_λ и \tilde{I}_λ – значения интенсивностей, относящихся к облачной и безоблачной частям пиксела соответственно; $\bar{\tau}_n$ – оптическая толщина слоя безоблачной атмосферы от поверхности земли до измерительного прибора; $\tilde{\tau}_n$ – оптическая толщина облачной атмосферы; n – весовая функция, учитывающая удельный вклад облачности в интенсивность уходящей радиации для данной длины волны; R – альbedo подстилающей поверхности: $\tilde{R} = \bar{R} + \frac{T^2 R^c}{1 - \bar{R} R^c}$; T и R^c – функции пропускания и отражения для облаков; $\tilde{\tau} = \tau_0 + \tau^n$; $\tilde{\gamma} = \gamma^0 + \gamma^n$; τ^0 и γ^0 – оптическая толщина и индикатриса для облаков; τ^n и γ^n – оптическая толщина и индикатриса надоблачного слоя; остальные обозначения общепринятые.

Принимая во внимание линейный характер задач (2) и (3), выражение для интенсивности в пределах одного пиксела можно записать в виде

$$I_\lambda(\mu, \tau) = \bar{I}(\mu, \tau) + \tilde{I}(\mu, \tau). \quad (4)$$

Модель наблюдений будем строить, исходя из того, что результат измерения можно представить в виде функционала

$$L_\lambda(I, \tau) = \int_M I_\lambda(\mu, \tau) \eta(\mu, \tau) dM, \quad (5)$$

где $\eta(\mu, \tau)$ – функция распределения приборов, характеризующая их чувствительность к вариациям измеряемых величин, и распределение приборов в пространстве. В зависимости от выбора $\eta(\mu, \tau)$ функционал (5) может представлять либо результаты измерения потока, либо результаты измерения интенсивности.

Функционал (5), характеризующий результат измерений на верхней границе атмосферы, можно записать в виде

$$L_\lambda(I, \tau_0) = \bar{L}_\lambda(I, \tau_0) + \tilde{L}_\lambda(I, \tau_0), \quad (6)$$

где

$$\bar{L}_\lambda(I, \tau_0) = L_\lambda(\bar{I}, \bar{\tau}_n) + \int_{\bar{\tau}_n}^{\tau_0} \frac{\partial}{\partial \tau} L_\lambda(\bar{I}, \tau) d\tau, \quad (7)$$

$$\tilde{L}_\lambda(I, \tau_0) = L_\lambda(\tilde{I}, \tilde{\tau}_n) + \int_{\tilde{\tau}_n}^{\tau_0} \frac{\partial}{\partial \tau} L_\lambda(\tilde{I}, \tau) d\tau. \quad (8)$$

Далее, следуя работам [2, 3] и обозначив функцию, характеризующую положение и чувствительность измерительного прибора, находящегося на высоте, соответствующей оптической толщине τ , через $I_\lambda^*(\mu, \tau)$ получим

$$L_\lambda(I, \tau) = \int_M I_\lambda(\mu, \tau) I_\lambda^*(\mu, \tau) d\mu. \quad (9)$$

Предположим, что на верхней границе атмосферы ($\tau = \tau_0$) известна функция $I^*(\mu, \tau_0) = \eta(\mu, \tau_0)$, тогда функционал (6) с учетом (9) примет значение

$$L_\lambda(I, \tau_0) = \int_M I_\lambda(\mu, \tau_0) I_\lambda^*(\mu, \tau_0) d\mu. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (7) может быть записано в виде

$$\bar{L}_\lambda(I, \tau_0) = \int_M \bar{I}_\lambda(\mu, \bar{\tau}_n) I_\lambda^*(\mu, \bar{\tau}_n) d\mu + \int_{\bar{\tau}_n}^{\tau_0} \int_M \left[\frac{\partial \bar{I}_\lambda(\mu, \tau)}{\partial \tau} I_\lambda^*(\mu, \tau) + \frac{\partial I_\lambda^*(\mu, \tau)}{\partial \tau} \bar{I}_\lambda(\mu, \tau) \right] d\mu d\tau. \quad (11)$$

Исключая $\frac{\partial \bar{I}_\lambda}{\partial \tau}$ из (11) с помощью уравнения (2а), приходим к соотношению

$$L_\lambda(I, \tau_0) = \int_M \bar{I}_\lambda(\mu, \bar{\tau}_H) I_\lambda^*(\mu, \bar{\tau}_H) d\mu + \int_{\bar{\tau}_H}^{\tau_0} \int_M \left\{ \left[\frac{\partial I_\lambda^*(\mu, \tau)}{\partial \tau} - \frac{1}{\mu} I_\lambda^*(\mu, \tau) \right] \bar{I}_\lambda(\mu, \tau) + \frac{1}{\mu} \bar{F}_\lambda(\mu, \tau) \right\} d\mu d\tau, \quad (12)$$

где $\bar{F}_\lambda(\mu, \tau) = \frac{S_\lambda}{4\pi} \bar{\gamma} e^{-\frac{1}{\mu_0} \tau}$.

Выберем функцию $I_\lambda^*(\mu, \tau)$ так, чтобы она удовлетворяла уравнению

$$\frac{dI_\lambda^*(\mu, \tau)}{d\tau} - \frac{1}{\mu} I_\lambda^*(\mu, \tau) = 0. \quad (13)$$

Тогда (10) переписывается в виде

$$\bar{L}_\lambda(I, \tau_0) = \int_M \bar{I}_\lambda(\mu, \bar{\tau}_H) I_\lambda^*(\mu, \bar{\tau}_H) d\mu + \int_{\bar{\tau}_H}^{\tau_0} \int_M \frac{1}{\mu} \bar{F}_\lambda(\mu, \tau) I_\lambda^*(\mu, \tau) d\mu d\tau. \quad (14)$$

В аналогичном виде может быть представлено и выражение (8).

Таким образом, нетрудно видеть, что выбирая в качестве функции распределения приборов угловую функцию чувствительности направленного в надир прибора с плоской приемной поверхностью, имеющего угол обзора π [4], искомый функционал $L(I, \tau_0)$ можно найти, решив лишь сопряженную задачу:

$$-\mu \frac{dI_\lambda^*(\mu, \tau)}{d\tau} + I_\lambda^*(\mu, \tau) = 0; \quad (15)$$

$$I_\lambda^*(\mu, \tau_0) = \delta(\mu - \mu_1) \mu,$$

где μ_1 – косинус азимутального угла спутника, отсчитываемый от местной вертикали.

Заметим, что структура сопряженной задачи будет одинаковой как для задачи (2) так и для задачи (3). Это справедливо в том случае, если измерения проводятся одним прибором на верхней границе при отсутствии исполнительных источников излучения в интервале $[\tau_0, \tau_H]$.

С учетом решения сопряженной задачи можно записать выражение для функционала (6) в следующем виде:

$$L(I_\lambda, \tau_0) = \int_M I_\lambda^*(\mu, \bar{\tau}_H) \bar{I}_\lambda(\mu, \bar{\tau}_H) d\mu + \int_M I_\lambda^*(\mu, \bar{\tau}_H) \tilde{I}_\lambda(\mu, \bar{\tau}_H) d\mu + \int_{\bar{\tau}_H}^{\tau_0} \int_M \frac{1}{\mu} I_\lambda^*(\mu, \tau) \bar{F}_\lambda(\mu, \tau) d\mu d\tau + \int_{\bar{\tau}_H}^{\tau_0} \int_M \frac{1}{\mu} I_\lambda^*(\mu, \tau) \tilde{F}_\lambda(\mu, \tau) d\mu d\tau, \quad (16)$$

где $I_\lambda(\mu, \tau)$ определяется по формуле (4):

$$\tilde{F}_\lambda(\mu, \tau) = \frac{S_\lambda}{4\pi} \tilde{\gamma} e^{-\frac{1}{\mu_0} \tau}.$$

Значение интенсивности на верхней границе с учетом выражения (16) и решения сопряженной задачи (15) (при $\tau_0 = 0$) может быть записано в виде

$$I_\lambda(\mu_1, \tau_0) = \bar{I}_\lambda(\mu_1, \bar{\tau}_H) e^{\frac{1}{\mu_1} \bar{\tau}_H} + \tilde{I}_\lambda(\mu_1, \bar{\tau}_H) e^{\frac{1}{\mu_1} \bar{\tau}_H} + \int_{\bar{\tau}_H}^{\tau_0} e^{\frac{1}{\mu_1} \tau} \bar{F}_\lambda(\mu_1, \tau) d\tau + \int_{\bar{\tau}_H}^{\tau_0} e^{\frac{1}{\mu_1} \tau} \tilde{F}_\lambda(\mu_1, \tau) d\tau. \quad (17)$$

Перейдем теперь к описанию численных экспериментов, которые были выполнены на основе изложенного алгоритма. В качестве примера рассмотрим результаты сравнения расчета поля оптических толщин облачности для фрагмента изображения, описанного в работе [1], с использованием модели наблюдения, предложенной в работе [5], и модели, описанной в настоящей статье. Сам метод расчета оптических толщин подробно описан в работе [1].

На рис. 1 представлены результаты расчетов оптической толщины перистых облаков с использованием данной модели, а на рис. 2 приведены результаты сравнения этих расчетов с расчетами, проведенными по модели из работы [5]. Хорошо известно [6, 7], что для данного типа облачности значения оптических толщин по порядку величины не превосходят единицы. Вместе с тем оптические толщины, рассчитанные по модели, взятой из работы [5], в подавляющем большинстве случаев превосходят эту величину и в отдельных случаях оказываются больше двух (рис. 2). Таким образом, результаты расчета оптических толщин на основе модели из работы [5], использованной в первоначальной версии системы интерпретации данных дистанционного зондирования [1], представляются нам явно завышенными (приблизительно на порядок), тогда как оптические толщины, полученные на основе методики, описанной в данной работе, (рис. 1) по порядку величины соответствуют рассматриваемому типу облачности. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что предложенный алгоритм построения моделей наблюдения в большей степени, чем модель из работы [5] учитывает реальные физические процессы, связанные с переносом излучения в атмосфере, и тем самым позволяет улучшить информативность систем интерпретации данных дистанционного зондирования и, в частности, системы, описанной в работе [1]. Кроме того, использование сопряженных функций позволяет построить достаточно универсальную модель наблюдений и оптимальным образом спланировать саму наблюдательную систему.

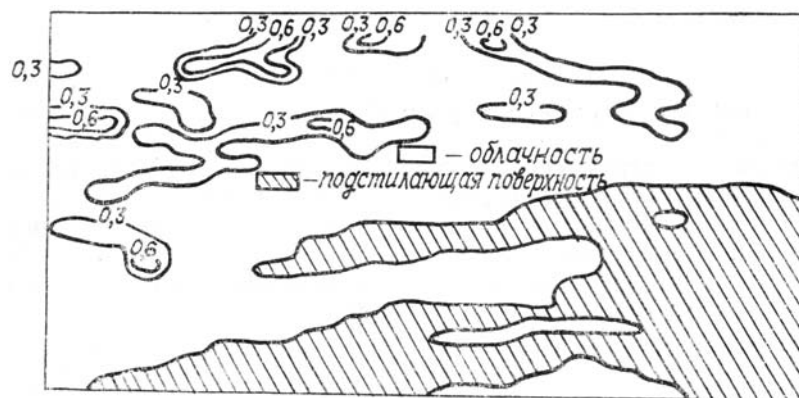


Рис. 1. Поле оптических толщин облаков, полученных на основе излагаемой модели

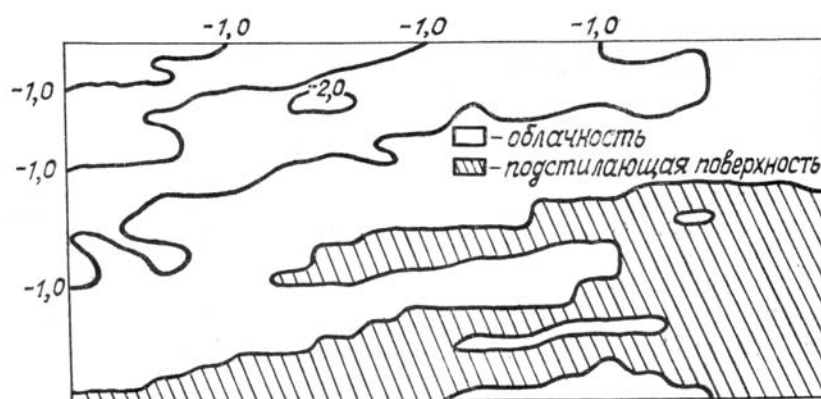


Рис. 2. Поле разностей значений оптических толщин, полученных с помощью модели, рассматриваемой в [5]

1. Кондратьев А. В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 4. С. 86–94.
2. Марчук Г. И. // Космические исследования, 1964. Т. II. Вып. 3. С. 462–477.
3. Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. 352 с.
4. Малкевич М. С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука. 1973. 303 с.
5. Arsing A., Childs J. D. // J. Appl. Meteor. 1985. V. 24. P. 322–333.
6. Кондратьев К. Я., Биненко В. И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 240 с.

7. Guzzi R., Vittori O., Tomasi C. // J. Atm. Sci. 1974. V. 31. P. 251–254.

Ленинградский гидрометеорологический институт
Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
28 сентября 1988 г.

V. A. Vasiliev, A. V. Kondratjev. Observations Modeling in the Problem on Interpretation of the Remote Sensing Data.

The paper presents an algorithm for constructing the system of observations in the problem on interpreting the remote sensing data based on the solution of an adjoint problem. Some advantages of the algorithm are demonstrated in the paper by concrete examples of its realization. The data obtained using this approach are compared with the data obtained using other observational models.