

УДК 621.384.3

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОПУСКАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРОЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА ИЗ КОСМОСА

В.А. АПОРОВИЧ, А.И. МИНОВ

Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие
«НИИ средств автоматизации»
пр. Независимости, 117, 220600, Беларусь

Поступила в редакцию 14 октября 2010

Описана методика оценки пропускания инфракрасного излучения атмосферой при наблюдении воздушного объекта из космоса. Предложены алгоритмы учета поглощения инфракрасного излучения парами воды и углекислым газом с учетом сферичности Земли. Показана адекватность предлагаемых подходов реальным процессам на примере наблюдения лесных пожаров из космоса.

Ключевые слова: поглощение инфракрасного излучения, спектральные коэффициенты пропускания, эквивалентная длина линии наблюдения.

Введение

Учет поглощения инфракрасного (ИК) излучения при моделировании наблюдения воздушного объекта из космоса является важной задачей. Основными факторами, определяющими пропускание ИК излучения атмосферой, являются селективное поглощение парами воды и углекислым газом.

Коэффициент пропускания излучения земной атмосферой τ_λ предлагается определять на основе данных таблиц спектральных коэффициентов пропускания излучения парами воды и углекислым газом для горизонтальной трассы на уровне моря [1, табл. 4.10, 4.11].

Методика

Входными данными для использования таблицы коэффициентов пропускания парами воды является толщина слоя осажденной воды ω . Эта величина может быть выражена соотношением

$$\omega = \omega_0 \cdot L, \quad (1)$$

где ω_0 – удельное количество осажденной воды на единицу длины трассы наблюдения, мм/м; L – протяженность трассы наблюдения, м.

Входными данными для использования таблицы коэффициентов пропускания углекислым газом является протяженность трассы L , по которой ведется наблюдение.

Коэффициент пропускания ИК-излучения атмосферой на некоторой длине волны τ_λ представляет собой произведение коэффициентов пропускания для паров воды $\tau_{w\lambda}$ и углекислого газа $\tau_{c\lambda}$ для этой же длины волны, т.е. $\tau_\lambda = \tau_{w\lambda} \cdot \tau_{c\lambda}$ [1, с. 181].

Однако данные этих таблиц применимы лишь к горизонтальным трассам на уровне моря. С высотой, из-за уменьшения плотности атмосферы, пропускание излучения значительно увеличивается. Для горизонтальной трассы на заданной высоте может быть использована фор-

мула пересчета в эквивалентную длину трассы на уровне моря, для которой могут использоваться данные известных таблиц [1, с. 181].

$$L_{eq} = L_h \cdot (p_h / p_0)^m, \quad (2)$$

где L_{eq} – эквивалентная длина трассы на уровне моря; L_h – истинная длина трассы на высоте h ; p_h / p_0 – отношение давления на высоте h к давлению на уровне моря; $m=0,5$ для паров воды, $m=1,5$ для углекислого газа.

Зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря может быть выражена барометрической формулой в ее общем виде [2, с. 73]:

$$p(h) = p_0 \cdot \exp\left(-\int_0^h g / (RT) dz\right), \quad (3)$$

где p_0 – давление атмосферы на уровне моря; g – ускорение свободного падения; R – удельная газовая постоянная воздуха; T – температура воздуха.

Исследуемые нами факторы (углекислый газ и пары воды) почти не оказывают влияния на обнаружение ИК-источника за пределами тропосферы (в средних широтах это высоты до 10000–12000 м). Для приближенного отражения зависимости давления от высоты в этом слое атмосферы используем в барометрической формуле среднее значение температуры тропосферы. В средних широтах среднегодовая температура воздуха у земли составляет 276 К, а на верхней границе тропосферы – 219÷215 К [3, с. 43], среднее значение температуры по высоте слоя тропосферы будет $T_m = (276+217)/2 = 246,5$ К.

Учитывая, что удельная газовая постоянная воздуха не изменяется до высоты 94000 м и равна $R=287,05287$ Дж·К⁻¹·кмоль⁻¹, можно получить

$$p(h) = p_0 \cdot \exp(-gh / (RT_m)) = p_0 \cdot \exp(-h / h_{op}), \quad (4)$$

где «высота однородной атмосферы» h_{op} в этом случае имеет значение

$$h_{op} = R \cdot T_m / g = 287,05287 \cdot 246,5 / 9,81 = 7213 \text{ [м]}. \quad (5)$$

В источнике [1, с. 181] предлагается приближенный метод расчета пропускания излучения вдоль произвольной трассы: разделение на ряд участков; применение к этим участкам табличных данных с введением поправки на высоту; перемножение результатов. Проверка показывает, что такое перемножение результатов для каждого участка не дает значение пропускания на всей трассе, взятых из той же таблицы. Поэтому предлагается другой подход.

Если зависимость вида (2) может быть выражена соотношением

$$L_{eq} = L_h \cdot \varphi(h), \quad (6)$$

то после разбиения вертикальной трассы (H_1, H_2) на элементарные участки ($h_i, h_i+\Delta h$), полагая значение функции $\varphi(h)$ на них постоянными и равными $\varphi(h_i)$, можно получить элементарные эквивалентные участки

$$\Delta L_{eqi} = \Delta h \cdot \varphi(h_i), \quad (7)$$

степень уменьшения которых от стандартного Δh зависит от высоты.

Суммируя элементарные эквивалентные участки и переходя к пределу при величине отрезка разбиения Δh , стремящейся к нулю, получим «эквивалентную вертикальную трассу»

$$L_{eq} \approx \sum \Delta L_{eqi}, \quad L_{eq} = \int_{H_1}^{H_2} \varphi(h) dh. \quad (8)$$

Протяженность произвольной эквивалентной вертикальной трассы от высоты H_R воздушного объекта до высоты H_S спутника (с учетом (2), (4)) будет

$$L_{eq} = \int_{H_R}^{H_S} \exp(-h \cdot m / h_{op}) dh = h_{op} / m \cdot (\exp(-H_R \cdot m / h_{op}) - \exp(-H_S \cdot m / h_{op})). \quad (9)$$

Например, вся атмосфера в вертикальном сечении по пропусканию ИК-излучения углекислым газом эквивалентна горизонтальной трассе на уровне моря, имеющей протяженность

$$L_{eq} = \int_0^{\infty} \exp(-3h / (2h_{op})) dh = 2h_{op} / 3 = 4809 \text{ [м]}. \quad (10)$$

Такой подход легко обобщается для наклонной трассы (см. рис. 1).

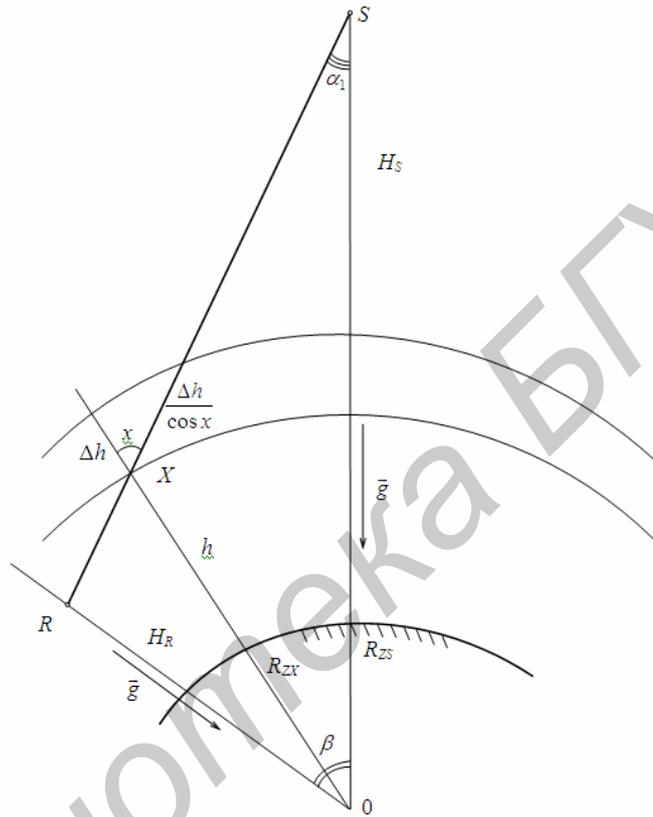


Рис. 1. К оценке эквивалентной длины наклонной трассы

Для центрального поля силы тяжести приращение высоты Δh выражается для произвольной точки X вдоль пути интегрирования (R, S) – линии наблюдения ракеты R со спутника S – в виде $\Delta h / \cos x$, где значение угла x изменяется от величины $(\alpha_1 + \beta)$ в точке R до величины угла α_1 в точке S .

Текущее значение косинуса угла x в зависимости от высоты h точки X может быть выражено соотношением

$$\cos(x) = \sqrt{(h + R_{ZX})^2 - (H_S + R_{ZS})^2 \cdot \sin^2(\alpha_1)} / (h + R_{ZX}), \quad (11)$$

где h – текущее значение высоты, изменяющееся от H_R до H_S ; $h + R_{ZX}$ – длина радиус-вектора текущей точки X ; $H_S + R_{ZS}$ – длина радиус-вектора точки S ; R_{ZX} , R_{ZS} – соответствующие радиусы Земли.

Таким образом, длина линии наблюдения может быть выражена соотношением

$$RS = \int_{H_R}^{H_S} (1 / \cos x) dh = \int_{H_R}^{H_S} (h + R_{ZX}) / \sqrt{(h + R_{ZX})^2 - (H_S + R_{ZS})^2 \cdot \sin^2(\alpha_1)} dh, \quad (12)$$

а эквивалентная длина линии наблюдения для углекислого газа будет

$$L_{eq} = \int_{H_R}^{H_S} (h + R_{ZX}) \cdot \varphi(h) / \sqrt{(h + R_{ZX})^2 - (H_S + R_{ZS})^2 \cdot \sin^2(\alpha_1)} dh =$$

$$= \int_{H_R}^{H_S} (h + R_{ZX}) \cdot \exp(-3h / (2h_{op})) / \sqrt{(h + R_{ZX})^2 - (H_S + R_{ZS})^2 \cdot \sin^2(\alpha_1)} dh. \quad (13)$$

Если известна функция $\omega_0(h)$, выражающая зависимость удельного содержания в атмосфере осажденной воды от высоты h (см. (1)), то для произвольной наклонной трассы (R, S) в центральном поле силы тяжести для входа в таблицу спектральных коэффициентов пропускания излучения парами воды может быть получена сразу «эквивалентная толщина слоя осажденной воды»

$$\omega_{eq} = \int_{H_R}^{H_S} (h + R_{ZX}) \cdot \varphi(h) \cdot \omega_0(h) / \sqrt{(h + R_{ZX})^2 - (H_S + R_{ZS})^2 \cdot \sin^2(\alpha_1)} dh. \quad (14)$$

В среднем над каждым квадратным метром земной поверхности в воздухе содержится 28,5 кг водяного пара. Абсолютная влажность атмосферы у поверхности Земли составляет в среднем (по широтам и сезонам) 11 г/м³. Половина всего водяного пара приходится на нижние 1,5 км атмосферы и свыше 99% – на тропосферу [3, с. 266]. С высотой содержание паров воды в атмосфере убывает значительно быстрее, чем давление.

Предлагается использовать распределение абсолютной влажности с высотой вида

$$w(h) = w_0 \cdot \exp(-(h / h_{ow})^k) \quad [\text{кг/м}^3]. \quad (15)$$

Из описанных выше условий имеем систему:

$$w(0) = w_0 = 0,011 \quad [\text{кг/м}^3],$$

$$\int_0^{\infty} w(h) dh = w_0 \cdot h_{ow} \cdot \Gamma(1 + 1/k) = 28,5 \quad [\text{кг}], \quad (16)$$

$$\int_{1500}^{\infty} w(h) dh = w_0 \cdot h_{ow} / k \cdot \Gamma(1/k, (1500 / h_{ow})^k) = 14,25 \quad [\text{кг}],$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция, $\Gamma(a, x)$ – неполная гамма-функция.

Разрешив систему относительно параметров w_0, h_{ow}, k , получим единственное решение:

$$w_0 = 0,011 \quad [\text{кг/м}^3],$$

$$h_{ow} = 2867,51862 \quad [\text{м}], \quad (17)$$

$$k = 1,48934.$$

Для ведения расчетов представляется допустимым принять $k=3/2$, тогда из второго уравнения системы (16) уточнится и параметр $h_{ow} = 2870$ [м].

Абсолютная влажность воздуха w [кг/м³] (при плотности воды 10³ кг/м³) численно равна удельному количеству осажденной воды ω_0 [мм/м].

Тогда для наклонной трассы (R, S) в центральном поле силы тяжести эквивалентная толщина слоя осажденной воды, с учетом (2), (4) и (14), будет

$$\omega_{eq} = \int_{H_R}^{H_S} (h + R_{ZX}) \cdot \exp(-h / (2h_{op})) \cdot w_0 \exp(-(h / h_{ow})^{1,5}) /$$

$$/ \sqrt{(h + R_{ZX})^2 - (H_S + R_{ZS})^2 \cdot \sin^2(\alpha_1)} dh \quad [\text{мм}] \quad (18)$$

В частности, эквивалентная толщина слоя осажденной воды всей атмосферы (вертикальная трасса) будет

$$\int_0^{\infty} \exp(-h / (2h_{op})) \cdot w_0 \exp(-(h / h_{ow})^{3/2}) dh =$$

$$= 0,011 \int_0^{\infty} \exp(-h / (2 \cdot 7213)) \cdot \exp(-(h / 2870)^{3/2}) dh = 25,13875 \text{ [мм]}. \quad (19)$$

Результаты

Адекватность предлагаемых подходов подтверждается на примере данных, приведенных в источнике [4, с. 385], где рассматривается возможность обнаружения лесных пожаров из космоса с использованием ИК-аппаратуры и приведены графики «спектральной энергетической светимости» при наблюдении пожара в надире со спутника (рис. 2, а, 3, а).

Построим аналогичные модельные зависимости, считая источником излучения абсолютно черное тело с соответствующей температурой.

Наблюдаемую спектральную энергетическую светимость оценим по формуле

$$J(\lambda, T) = \tau_{\lambda} \cdot J_{bb}(\lambda, T), \quad (20)$$

где спектральный коэффициент пропускания излучения атмосферой $\tau_{\lambda} = \tau_{w\lambda} \cdot \tau_{c\lambda}$ определим по коэффициентам пропускания излучения парами воды $\tau_{w\lambda}$ и углекислым газом $\tau_{c\lambda}$, выбранным из таблиц 4.10 и 4.11 [1] по входным данным (10) и (19) с учетом интерполяции коэффициентам пропускания излучения парами воды $\tau_{w\lambda}$ и углекислым газом $\tau_{c\lambda}$, закон Планка для получения результатов в сопоставимых единицах используем в виде $J'_{bb}(\lambda, T) = 37415 / \lambda^5 \cdot 1 / (\exp(14388 / (\lambda T)) - 1)$ [Вт/(см²·мкм)]. (21)

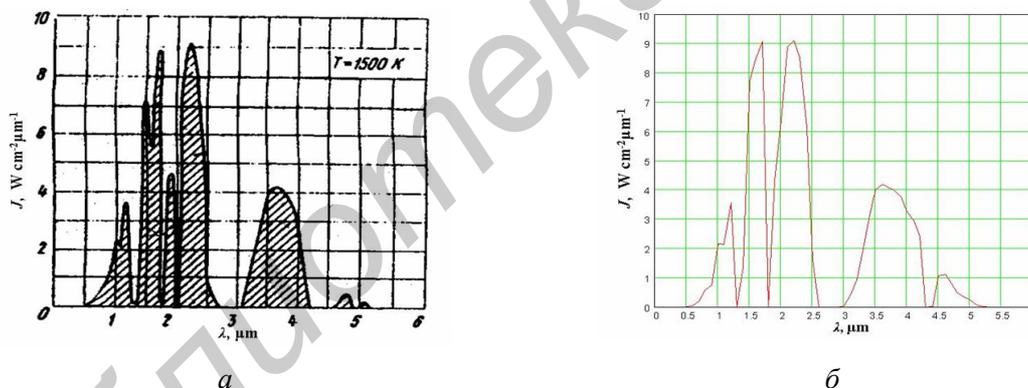


Рис. 2. Спектральное распределение энергии излучения горячей древесины при наблюдении через атмосферу Земли: экспериментальные данные – а; данные расчета – б

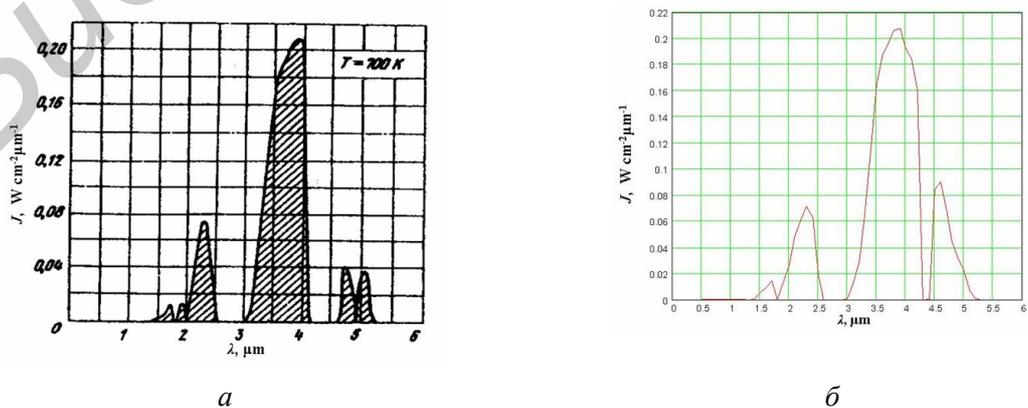


Рис. 3. Спектральное распределение энергии излучения тлеющих углей при наблюдении через атмосферу Земли: экспериментальные данные – а; данные расчета – б

Как видно (рис. 2,б, 3,б), полученные модельные зависимости удовлетворительно соответствуют приведенным в источнике графикам.

Заключение

Таким образом, полученные соотношения (13) и (18) совместно с таблицами 4.10, 4.11 источника [1] позволяют оценить пропускание ИК-излучения атмосферой для некоторого ее среднестатистического состояния для произвольного положения воздушного объекта и спутника ИК-разведки.

ATMOSPHERIC INFRARED RADIATION TRANSMISSION ASSESSMENT METHODS FOR AN AIR OBJECT OBSERVED FROM SPACE

U.A. APAROVICH, A.I. MINAU

Abstract

The paper describes assessment methods for the transmission of infrared radiation by the atmosphere when an air object is observed from space. Algorithms for calculation of infrared radiation absorption by water vapor and carbon dioxide considering the Earth sphericity are offered. The adequacy of the offered approaches to real processes is demonstrated using space surveillance of forest fires as an example.

Литература

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М., 1978.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М., 1958.
3. Хромов С.П. Вода в атмосфере. М., 1978.
4. Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов. М., 2003.