УДК 535.8

Оптико-геофизическая модель атмосферы "Тропосфера-2000"

В. Л. Филиппов, М. В. Танташев
ФГУП «НПО "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

Оптико-геофизическая модель "Тропосфера-2000" разработана на основе обобщения материалов по геофизическим параметрам атмосферы в различных климатических условиях, данных о спектральных зависимостях оптических показателей поглощения и рассеяния компонентами атмосферы, а также с учетом опыта применения ранее созданной модели "Тропосфера-82" и анализа известных зарубежных разработок.

Оптико-геофизическая модель (ОГМ) "Тропосфера-2000" разработана на основе критического обобщения:

имеющихся материалов, определяющих геофизические параметры атмосферы в различных климатических условиях и в различные сезоны года;

данных о спектральных зависимостях показателей поглощения и рассеяния оптического излучения компонентами атмосферы;

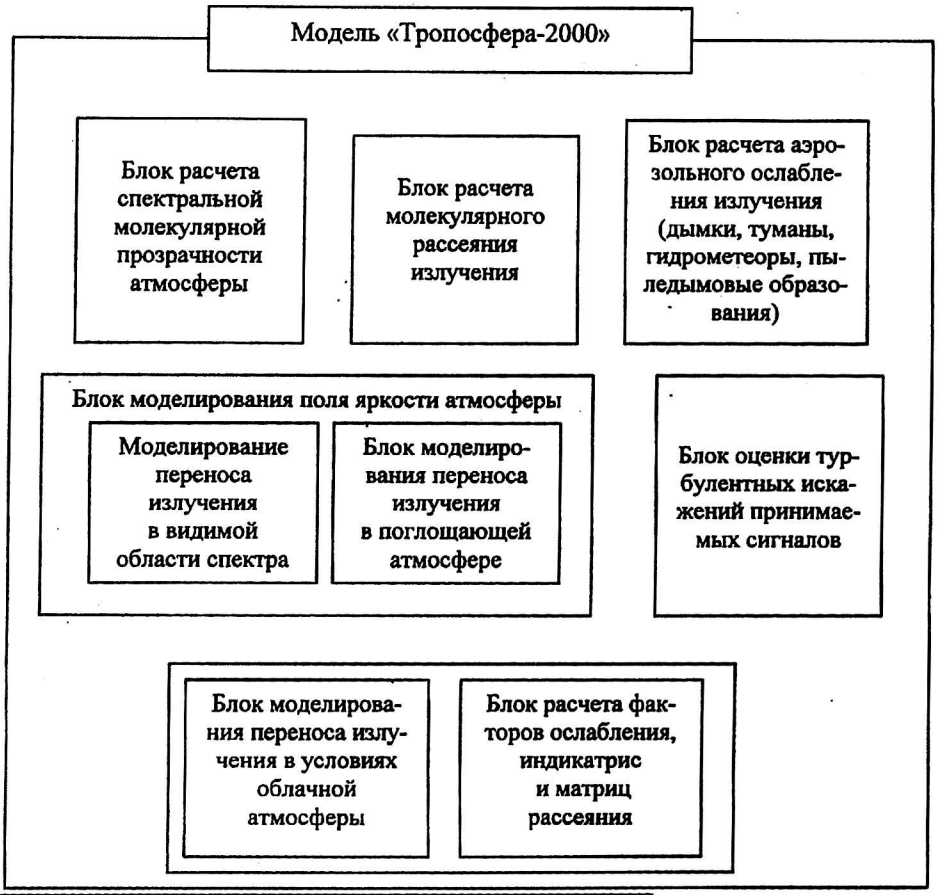
опыта применения ранее созданной в ГУП «НПО "ГИПО"» модели "Тропосфера-82" и анализа известных зарубежных разработок (Lowtran, Modtran).

Научно-техническое обоснование модели "Тропосфера-2000" базируется на основополагающих исследованиях, выполненных в Институте.

Для обеспечения инженерных расчетов облученности входных зрачков оптико-электронной аппаратуры каждый из обозначенных тематических блоков определяется двумя видами исходных данных:

- сведениями о геофизических параметрах оптической трассы визирования, которые оформляются в виде геофизической модели атмосферы;
- сведениями о закономерностях спектрального поглощения и рассеяния оптического излучения различными компонентами атмосферы.

Причем предложено отдельное рассмотрение указанных структурных составляющих ОГМ (рисунок).



Блок-схема оптического раздела модели "Тропосфера-2000"

© Филиппов В. Л., Танташев М. В., 2004

Обсуждаемый раздел ОГМ определяет условия естественной атмосферы в пределах высот 0—30 км в интервале длин волн 0,28—15,0 мкм (спектральное разрешение $\Delta\lambda = 0{,}01$ в области 0,28—0,4 мкм; $\Delta\lambda = 0{,}025$ для $\lambda \in$ 0,4—1,0 мкм; $\Delta\lambda = 0{,}05$ для $\lambda \in$ 1,0—5,5 мкм; $\Delta\lambda = 0{,}1$ для $\lambda \in$ 5,5—15,0 мкм).

В геофизическом блоке ОГМ учтены модели атмосферы для следующих климатических зон [1]:

- холодные районы с теплым летом;
- районы с умеренным климатом;
- районы с умеренно теплым климатом;
- районы субтропиков;
- районы с морским климатом;
- районы с тропическим сухим климатом;
- районы с тропическим влажным климатом;
- районы с морским тропическим климатом;
- районы горных массивов, которые дополнены моделями стандартной субарктической и среднеширотной атмосфер США согласно [2, 3].

Расчет спектрального пропускания неоднородных оптических трасс ОГМ выполняется в соответствии с формулой

$$T_i(\lambda) = \exp\left(-\int_L q_i(l) G_i(\lambda, l, p)\, dl\right),$$

где $q_i(l)$ — концентрация i-го поглощающего компонента на оптической трассе L;

$G(\lambda, l, p)$ — функция, зависящая от длины волны, давления и температуры, определяемая в соответствии с эмпирическим методом расчета эффективного количества W_i каждого поглощающего компонента атмосферы [3—5].

Аэрозольная компонента атмосферы учитывается на основе спектральных и оптико-микрофизичеких моделей [4, 6, 7]. Эмпирический показатель аэрозольного ослабления в последних определяется соотношением

$$\alpha(\lambda) = \frac{3{,}912}{S_M} n_0 + n_1 \lambda^{-n_2} + \beta'_\lambda, \qquad (1)$$

где S_M — метеорологическая дальность видимости;

n_0, n_1, n_2 — эмпирические параметры, установленные экспериментально на основе длительных натурных исследований и заданные таблично для конкретных метеорологических ситуаций;

β_λ — зависящая от длины волны табличная функция, имеющая один и тот же спектр величин в условиях относительной влажности $f \geq 40$ %.

Показатель ослабления (1) с учетом континуального поглощения излучения парами воды в соответствии с [4, 8, 9] определяется (для горизонтальных приземных трасс) соотношением

$$\alpha(\lambda) = \left\{\frac{3{,}912}{S_M}\left[n_0 + n_1\lambda^{-n_2} + \beta'_\lambda\right] + \right.$$

$$\left. + \left[(K_1(\lambda)P_E + K_2(\lambda)e)\frac{21{,}67e}{273 + t^o}\right]\right\},$$

где K_1, K_2 — спектральные коэффициенты поглощения;

P_E — эффективное давление;

e — парциальное давление паров воды.

Модель высотного хода показателя аэрозольного ослабления в подоблачной атмосфере базируется на материалах исследований [6, 10].

Проведенные оценки показали, что в нижней тропосфере в пределах $h \leq H_2$ однородное распределение аэрозоля образуется за время, не превышающее 1—2 ч. При наличии слоистой облачности это время еще меньше, поскольку коэффициент турбулентности в этих условиях достигает больших значений, а толщина слоя перемешивания ограничивается H_{NGO}. В этом случае в слое $\leq H_{NGO}$ упругость водяного пара $e(h) = \text{const}$ и меняется только относительная влажность $f(h)$ с учетом линейного убывания температуры:

$$T(h) = T_0 - \gamma h,$$

где γ — вертикальный градиент температуры;

T_0 — температура воздуха у поверхности земли.

Изменение насыщающей упругости паров воды с высотой имеет вид

$$E(h) = E_0 \exp(-\mu h),$$

если $\mu = \dfrac{L_0}{R_n T_0 (T_0 - \gamma h)}$;

L_0 — удельная теплота парообразования;

R_n — удельная газовая постоянная водяного пара.

Высота нижней границы облачности, совпадающая с уровнем конденсации $h_k[f(h_k) = 100\ \%]$, определяется из уравнения Клайперона-Клаузиуса

$$H_{NGO} = 2{,}3\frac{T_0^2 2 - \lg f_0}{\xi\gamma}, \quad \xi = \frac{L_0}{R_n}. \qquad (2)$$

Соотношение (2) позволяет найти параметр γ, определяющий изменение величины μ (h) в формуле:

$$f(h) = \frac{eh}{E(h)} = \frac{eL0}{E_0 \exp(-\mu h)} = f_0 \exp(\mu h).$$

Согласно [10]

$$\alpha_0\, h, f = k_0 + k_1 f^{k_2} h \qquad (3)$$

при $k_1 = 0{,}96$; $k_2 = 11{,}7$.

Величина k_0 определяется из (3) для заданных параметров f_0, $\alpha_\alpha(h = 0)$:

$$k_0 = \alpha, \qquad h = 0 - k_1 f_0^{k_2}.$$

В результате для подоблачного слоя атмосферы имеем:

$$\alpha_\lambda\, h = \alpha_\alpha,\ h = 0 + k_1 f_0^{k_2} \exp^{k_2 \mu h} - 1.$$

Одна из задач, которая должна быть решена с применением ОГМ "Тропосфера-2000", — адекватное описание условий наблюдения.

Теория видения в рассеивающей атмосфере основана на решении уравнения переноса, являющегося линейным интегральным уравнением Фредгольма второго рода

$$Y(x) = \int k(x' - x) Y(x')\, dx' + Y_0(x), \qquad (4)$$

где $Y(x)$ — интенсивность излучения в точке x;
$Y_0(x)$ — поле нерассеянного излучения;
x — точка фазового пространства, размерность которого зависит от условий задачи, от наличия в ней симметрии;
$k(x' \to x)$ — ядро уравнения, содержит всю информацию об оптических свойствах среды, в которой распространяется излучение.

Большая размерность (4) представляет наибольшую сложность при решении уравнения. По мере развития вычислительных средств все больше практических задач в области переноса излучения переводятся в разряд решаемых, однако и в настоящий момент остаются не решенные до конца проблемы. К числу последних следует отнести задачи расчета переноса излучения в сферической атмосфере (ее решение возможно, например, методом Монте-Карло [11, 12], применение которого влечет за собой большие затраты машинного времени), а также при произвольном задании матрицы рассеяния и учете поляризации излучения.

Как показал опыт решения уравнения (4) [11, 12] учет сферичности становится необходимым при распространении излучения в направлениях, составляющих угол менее 5—10° к горизонтальной плоскости. Это означает, что в большинстве случаев справедливо приближение плоской геометрии.

В плане развития обсуждаемой модели были проведены работы по созданию надежной в инженерных приложениях методики расчета при определении малых величин контраста. Наиболее подходящим в этом смысле оказался метод сложения (удвоения) — МС. Математический аппарат МС не выходит за пределы основ линейной алгебры, физически прозрачен и хорошо вписывается во все возрастающие возможности современных вычислительных средств. К сожалению, приведенные в [13, 14] матричные соотношения не являются четко определенными, поэтому их непосредственное применение при построении разрабатываемого алгоритма было невозможно. В результате принята комбинация МС и многопотокового приближения. Суть обозначенной методики заключается в том, что для достаточно тонкого слоя рассеивающей среды, когда ее оптическая толщина $\Delta\tau$ много меньше 1, отдельно для отражения и пропускания рассчитываются в однократном приближении коэффициенты $t_{1,n}$ и $r_{1,n}$, представляющие собой вероятность событий того, что частицы излучения, вошедшие в слой в направлении k, выйдут из него в направлении n. Каждому номеру k и n соответствует своя часть пространства в верхней и нижней полусферах. Все излучение, рассеянное в направлении n в случае отражения, определяется соотношением

$$I_n^r = I_1^0 r_{1,n} + I_2^0 r_{2,n} + I_3^0 r_{3,n} + \ldots . \qquad (5)$$

Аналогичное соотношение может быть записано и для пропущенного излучения с той лишь разницей, что к элементам с $k = n$ добавляется член, соответствующий нерассеянному излучению

$$I_n^{(t)} = I_1^{(0)} t_{1,n} + \ldots I_n^{(0)} t_{n,n} + \exp\left(-\frac{\Delta\tau}{\cos\varphi_n}\right)\ldots , \qquad (6)$$

где φ_n — угол падения для n-го потока.

Нетрудно видеть, что соотношения (5) и (6) можно записать в матричном виде

$$I^{(r)} = I^{(0)} R,$$

$$I^{(t)} = I^{(0)} T, \qquad (7)$$

где $I^{(0)}$ — вектор падающего излучения, каждая проекция которого (I_k) соответствует потоку, приходящемуся на k-й элемент пространства.

Согласно (6) легко могут быть определены потоки отраженного и пропущенного излучения для удвоенного слоя, в этом случае

$$I^{(r)} = I^0 (R + TRT + TRRRT), \qquad (8)$$

$$I^{(t)} = I^0 (TT + TRRT + TRRRRT).$$

Подобные же матричные ряды имеют место и в случае сложения, когда складываются два неодинаковых слоя с матричным отражением и пропусканием R_1, R_2 и T_1, T_2. Матричные ряды (7) и (8) быстро сходятся, машинный счет не вызывает никаких сложностей.

Анализ соответствия результатов расчета, полученных по предложенной упрощенной методике и "точным" алгоритмом, показал расхождение величин менее 1 %.

Литература

1. Атмосфера: Справочник. — Л.: Гидрометиоиздат, 1991. — 509 с.
2. Atmospheric transmitance/radiance: computer code Lowtran//Air Force Geaf. Lab/(OPI), August, 1983.
3. Справочник по ИК-технике/Под ред. У. Вулф, Г. Цесис. Т. 1. Физика ИК-излучения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1995. — 606 с.
4. *Филиппов В. Л. и др.* Оптическая погода в нижней тропосфере. — Казань/ Дом печати, 1998. — 182 с.
5. *Макаров А. С., Омелаев А. И., Филиппов В. Л.* Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем/Под ред. В. Л. Филиппова. — Казань: УнипрессЮ, 1998. — 318 с.
6. *Иванов В. П.* Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. — Казань: Новое знание, 2000. — 356 с.
7. *Philippov V. L.* Adequacy of modeling the cuvironment in the interest of developing night vision devices//SPIE. V. 4340. P. 139—145.
8. *Филиппов В. Л., Макаров А. С., Иванов В. П.* Построение региональных полуэмпирических моделей оптических характеристик атмосферы: Докл. АН СССР, 1982. Т. 256. № 6.
9. *Филиппов В. Л.,.Козлов С. Д., Макаров А. С.* О структуре спектральных коэффициентов ослабления излучения в окнах прозрачности атмосферы: Обзор. — М.: ЦНИИ и ТЭИ, 1981. № 2618. — 145 с.
10. *Филиппов В. Л., Иванов В. П.* О зависимости аэрозольного ослабления оптического излучения от влажности воздуха//Метеорология и гидрология, 1979. № 4. С. 65—69.
11. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике/Под общ. ред. Г. И. Марчука. — Новосибирск: Наука, 1976 — 175 с.
12. *Задорина Н. В., Румянцева Н. А., Танташев М. В., Филиппов В. Л.* Влияние атмосферы на условия наблюдения объектов в коротковолновой области спектра. — М.: НТЦ Информатика. — 132 с.
13. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета/ Под ред. Ж. Ленобль. — Л.: Гидрометиоиздат, 1990. — 261 с.
14. *Ку-Нан Лиоу.* Основы радиационных процессов в атмосфере: Пер. с англ.. — Л.: Гидрометиоиздат, 1984. — 375 с.

Optical-geophysical atmospheric model "Troposfere-2000"

V. L. Filippov, M. V. Tantashev
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

The optical-geophysical atmospheric model "Troposphere-2000" has been developed on the basic of generalizing the materials on geophysical parameters of atmosphere in different climatic conditions, the data on spectral dependences of optical absorption and dispersion by atmosphere components, and also taking into consideration the application of the "Troposphere-82" (as a pre-existing model) and the analysis of known foreign models.

* * *