«Оптика атмосферы», **2**, № 11 (1989)

УДК 551.521.3 : 535.36

Е.О. Джетыбаев, Т.З. Мулдашев, И.В. Мишин

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ АТМОСФЕРЫ

Сравниваются данные численных расчётов оптических передаточных функций атмосферы, полученные методами сферических гармоник, Монте-Карло, функции источников и итераций. Расчёты выполнены с использованием моделей реальной атмосферы.

Введение

Оптические передаточные функции атмосферы, определяемые расчетным путем из решений краевых задач теории переноса излучения, используются при имитационном моделировании полей яркости уходящего коротковолнового излучения и атмосферной коррекции данных дистанционного зондирования подстилающих поверхностей. Методам их вычисления посвящено много работ ([1—9]), но отсутствие единого фонда соответствующих тестированных вычислительных алгоритмов создает для пользователей трудности, связанные с поиском и усвоением надежных алгоритмов и программ. В связи с этим сохраняет актуальность проверка точности и быстродействия различных вычислительных алгоритмов на основе согласованных сравнительных тестов.

Сравнения некоторых алгоритмов расчета характеристик переноса излучения в плоских слоях, моделирующих атмосферу, облака и туманы, выполнены в [2—4]. В [8] представлены результаты сравнения значений оптических передаточных функций безоблачной трехмерной атмосферы, полученных методами сферических гармоник, Монте-Карло и функции источников. В [9] аналогичные расчеты выполнены методом итераций. В [8, 9] были использованы оптические модели атмосферы [10, 11]. Настоящая статья содержит более общие сравнения значений оптических передаточных функций на основе извлечений численных материалов из [8, 9]. Основная цель статьи состоит в том, чтобы привлечь внимание разработчиков к тестированию численных методов теории переноса излучения для оптических моделей реальной атмосферы. Сравнение различных вычислительных программ необходимо для их классификации по точности и быстродействию.

Оптические модели.

Были взяты две оптические модели атмосферы: модель 1 [9| на длинах волн 0,55 и 0,75 мкм и модель II [10] на длинах волн 0,3471; 0,6943; 1,06 мкм. Особенность модели I состоит в следующем: слой атмосферы (высотой h = 50 км) разбит на 50 подслоев, значения $\alpha(z)$, $\sigma(z)$ заданы на границах подслоев; индикатриса рассеяния $f(\cos\gamma)$ постоянна по высоте, значения $f(\cos\gamma)$ даны с шагом 5°, а в области сильного изменения через 1°; в точках γ = 1,2, 3, 4° значения $f(\cos\gamma)$ получены интерполяцией [7] табличных данных [9]. Особенность модели II: слой атмосферы (h = 30 км) разбит на 35 подслоев; значения $\alpha(z)$, $\sigma(z)$ заданы на границах подслоев; по отношению к закону рассеяния атмосфера является трехслойной, значения $f^{(i)}(\cos\gamma)$, i = 1, 2, 3, даны на более частой сетке, чем в модели I; в передней части индикатрисы разбивка идет через 2°, поскольку индикатрисы $f^{(i)}(\cos\gamma)$ менее вытянуты, чем в модели 1; молекулярное рассеяние $f_R(\cos\gamma) = \dfrac{3}{16\pi}(1+\cos^2\gamma)$ учитывалось только в случае λ = 0,3471 мкм, при этом суммарные индикатрисы вычислялись по формуле $f^{(i)}\cos\gamma = c_a^{(i)} f_a^{(i)}(\cos\gamma) + c_R^{(i)} f_R(\cos\gamma)$, $ш$ = 1, 2, 3, где $c_a^{(i)} = \tau_a^{(i)} / \tau_0^{(i)}$; $c_R^{(i)} = \tau_R^{(i)} / \tau_0^{(i)}$; $\tau_0^{(i)} = \tau_a^{(i)} + \tau_R^{(i)}$; $\tau_a^{(i)}, \tau_R^{(i)}$ — аэрозольная и рэлеевская оптические толщины в i-м слое.

Модель переноса излучения определялась краевой задачей в трехмерной несферической атмосфере, ограниченной поверхностью с неоднородным альбедо:

$$\begin{cases} (s,\ \nabla I) + \alpha(z)\, I = \dfrac{\sigma(z)}{4\pi} \displaystyle\int\limits_{\Omega} I(z,\ r,\ s')\, f(z,\ \cos\gamma)\, ds'; \\ I\,|_{z=0,\, s\in\Omega_+} = \pi S_\lambda \delta(s - s_0); \\ I\,|_{z=h,\, s\in\Omega_-} = \dfrac{q(r)}{\pi} \displaystyle\int\limits_{\Omega_+} I(h,\ r,\ s')\, \mu' ds', \end{cases} \qquad (1)$$

где $I \equiv I(z, \boldsymbol{r}, s) \equiv I_\lambda(z, x, y, \theta, \varphi)$ — спектральная яркость излучения; $\boldsymbol{r} = \{x, y\}$ — вектор горизонтальных координат; $\boldsymbol{s} = \{\mu, \boldsymbol{s}_\perp\}$ — единичный вектор; $\mu = \cos\theta$; $\boldsymbol{s}_\perp = \sqrt{1-\mu^2}\{\cos\varphi, \sin\varphi\}$; θ, φ — зенитный и азимутальный углы распространения излучения; $\boldsymbol{s}_0 = \{\zeta, \sqrt{1-\zeta^2}, 0\}$ — направление падения солнечных лучей; $\zeta = \cos\theta_0$; θ_0 — зенитный угол Солнца; Ω_-, Ω_+ — верхняя и нижняя полусферы; πS_λ — солнечная постоянная, вт/(мкм · см^2 · ст); $q(\boldsymbol{r})$ — альбедо поверхности; $\alpha(z)$ — коэффициент ослабления; $\sigma(z)$ — объемный коэффициент рассеяния; z — вертикальная координата; h — толщина атмосферы; $f(z, \cos\gamma)$ индикатриса рассеяния; $\cos\gamma = \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{s}'$; $\boldsymbol{s}$, $\boldsymbol{s}'$ — направление рассеянного и падающего лучей.

Решение краевой задачи (1) с точностью до нелинейной составляющей относительно вариации $\tilde{q}(\boldsymbol{r})$ для направлений $\boldsymbol{s} \in \Omega$ имеет вид [6]

$$I = D + \frac{\bar{q}E\Psi_0}{1-\bar{q}c_0} + \frac{E}{1-\bar{q}c_0} \cdot \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Psi(z, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{s})\hat{\tilde{q}}(\boldsymbol{p})\, e^{-i(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{r})}}{1-\bar{q}C(\boldsymbol{p})}\, d\boldsymbol{p}, \tag{2}$$

где $D \equiv D(z, \mu, \zeta, \varphi)$ — яркость атмосферной дымки; $\pi E = \pi\left[\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^1 D(h, \mu, \zeta, \varphi)\mu d\mu d\varphi + \zeta S_\lambda e^{-\tau_0/\zeta}\right]$ — освещенность земной поверхности при $\bar{q} = 0$, усредненная по горизонтальным координатам; $\Psi(z, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{s}) = e^{i(\boldsymbol{p}, \tilde{\boldsymbol{r}})}[e^{-\tau_0/\eta} + Ae^{i\Phi}]$ — оптическая пространственно-частотная характеристика атмосферы; $\Psi_0 = e^{-\tau_0/\eta} + A_0$; $c_0 = 2\int_0^1 \Psi_0(h, \mu)\mu d\mu$ — сферическое альбедо; $\eta = |\mu| = \cos\Theta'$; $\Theta' = \pi - \Theta$; $A \equiv A(z, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{s})$, $\Phi \equiv \Phi(z, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{s})$ — амплитудная и фазовая характеристики атмосферы как фильтра пространственных частот изображения; $\boldsymbol{p} = \{p_x, p_y\}$ — вектор пространственных частот; $A_0 \equiv A_0(z, \mu) = A(z, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{s})\big|_{p=0}$ — норма амплитудной характеристики атмосферы; $\bar{q}$, $\tilde{q}(\boldsymbol{p})$ — среднее и Фурье- спектр вариации альбедо подстилающей поверхности $C \equiv c(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{\pi}\int_{\Omega_+} \Psi(h, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{s})\mu d\boldsymbol{s}$, $\tilde{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{s}_\perp h / \eta$ — вектор смещения.

Оптические передаточные функции D, E, A_0, c_0, A, Φ, C, определяющие действие передаточного оператора атмосферы, естественно использовать как объекты для тестовых расчетов. Заметим, что при известных A, Φ функция размытия точки $v(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty} Ae^{i_0 - i(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{p})} d\boldsymbol{p}$ вычисляется в общем случае методом быстрого преобразования Фурье.

Численные методы и результаты расчетов

Из литературных источников известно, что D, E, A_0, c_0, A, Φ, C вычислялись методом итераций [5, 9] и методом сферических гармоник [9, 12, 13]. Методом Монте-Карло [1] кроме независящих от $\boldsymbol{p}$ величин D, E, A_0, c_0 вычислялась только функция A [14, 15]. Функция D, E, A_0, c_0, A вычислялись также приближенным методом [6, 16].

Погрешность методов Монте-Карло (ММК) и итераций (МИ) определяется количеством моделируемых траекторий фотонов и выбором разностной схемы соответственно. Погрешность методов сферических гармоник (МСГ) и функции источника (МФИ) зависит от порядка P_{2N+1} - приближения. Обычно число N определяется на этапе разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра. Реальная погрешность расчетов может быть выше методической погрешности, так как зависит от тех или иных стандартных вычислительных процедур. В настоящей работе применялись ММК [1, 17], МСГ [12, 13] и МФИ на базе P_1 - приближения (МФИ$_1$) [6, 16]. Последний метод наиболее грубый и вызывает интерес лишь в связи с простотой реализации в системах оперативной обработки информации.

В нижеследующих сравнениях за эталонные будем принимать расчеты ММК и МИ [9]. В алгоритме ММК при моделировании траектории фотона используется оценка по направлению. Первые два столкновения производятся без вылета из среды и поглощения; соответствующее смещение учитывается весовыми коэффициентами. Прямое моделирование траектории вводится с третьего столкновения. Дисперсия ошибки ММК при расчете D, E, A_0, c_0 составила в среднем 1%. Относительная погрешность МИ в расчетах [9] также составляет в среднем приблизительно 1%. Точность остальных алгоритмов оценивалась практически путем сравнения численных результатов. В табл. 1 показано, какие оптические характеристики позволяет получить каждая из соответствующих программ.

Т а б л и ц а 1

Возможности вычислительных программ

Метод	Оптические передаточные функции					
	D	E	A_0	c_0	A	Φ
МСГ	+	+	+	+	+	+
$МФИ_1$	+	+	+	+	+	—
ММК	+	+	+	+	—	—

Функции A, Φ с помощью ММК не вычислялись. Вычисления $МФИ_1$ функции Φ характеризуются невысокой точностью и не дают физически объяснимые зависимости $\Phi = \Phi(\boldsymbol{p})$.

Во всех алгоритмах интенсивность однократного рассеяния вычисляется аналитически. В программах МСГ и ММК применялась кусочно-постоянная аппроксимация коэффициентов $\alpha(z)$, $\sigma(z)$. При реализации $МФИ_1$ истинное поглощение не учитывалось; при вычислении A высотная зависимость $\sigma(z)$ аппроксимировалась экспонентой, а индикатриса трехслойной атмосферы — функцией $f(\cos\gamma) = \sum_{i=1}^{3} \tau_0^{(i)} f^{(i)}(\cos\gamma) / \tau_0$. Время расчета одного варианта, включающего вычисление E и c_0, а также угловых зависимостей D, A_0 при двух значениях φ и фиксированном Θ_0, по программам ММК, МСГ и МФИ, на ЕС-1045 составило 10 мин, 2 мин и 30 с соответственно.

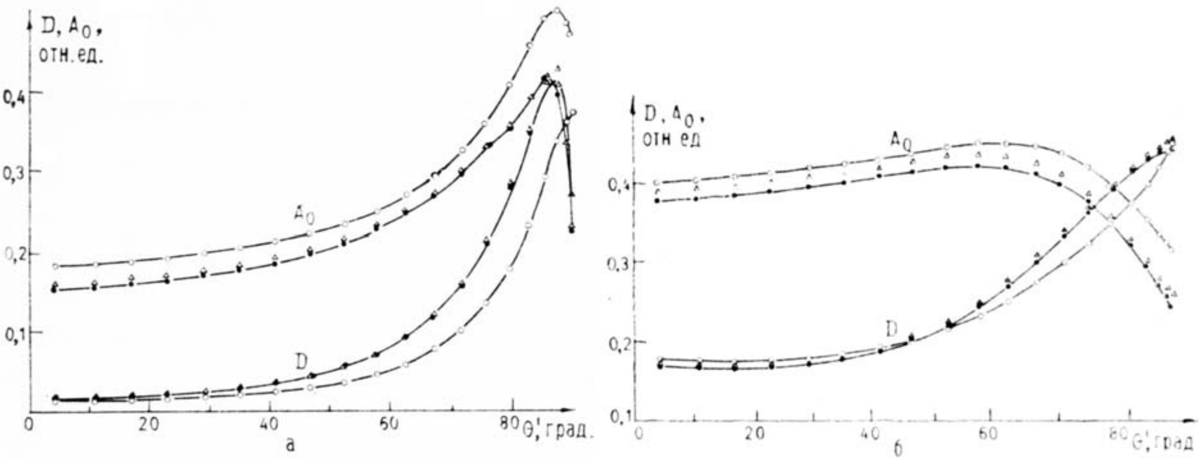

Рис. 1. Угловые зависимости D и A_0 по модели I (*а*) и модели II (*б*) для $\theta_0 = 45°$, $\varphi = 0°$: точки — МСГ; кружки — $МФИ_1$, треугольники — МИ

Расчеты передаточных функций для указанных выше оптических моделей атмосферы проводились с точностью до S_λ. Значения входных параметров принимались следующими: $z = 0$, $\varphi = 0$ и 180°, $\Theta_0 = 0$ и 45°. На рис. 1 представлены угловые зависимости D, A_0 для случаев $\lambda = 0{,}75$ мкм (модель I) и $\lambda = 0{,}3471$ мкм (модель II). В табл. 2 даны соответствующие значения E, c_0. На рис. 2, 3 представлены нормированная амплитудная A/A_0 и фазовая Φ характеристики для $\lambda = 0{,}3471$ мкм. Для сравнения на рис. 1—3 и в табл. 2 приведены также данные расчетов МИ [9].

Т а б л и ц а 2

Значения оптических передаточных функций, полученные различными методами

Метод	$\lambda = 0{,}75$ мкм		$\lambda = 0{,}3471$ мкм	
	E	c_0	E	c_0
МИ	0,6530	0,1036	0,4406	0,3598
МСГ	0,6491	0,1049	0,4348	0,3563
$МФИ_1$	0,6670	0,0865	0,4518	0,3839

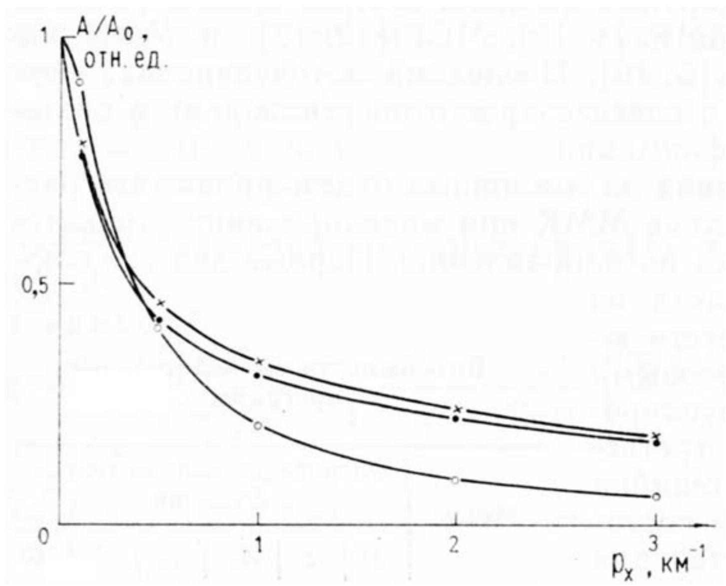

Рис. 2. Нормированная амплитудно-частотная характеристика A/A_0 по модели II для $\eta = 0{,}997$, $\varphi = 0°$, $p_y = 0$: точки — МСГ; кружки — МФИ$_1$; крестики — МИ

Выполненные расчеты показали, что значения D, E, A_0, c_0, полученные МСГ и ММК, практически совпадают. Поэтому полученные ММК расчетные значения этих величин на рис. 1 и в табл. 2 не приводятся. Как видно из рис. 1—3, данные МСГ хорошо согласуются с данными МИ [9]. При совпадении расчетов МСГ (точки) и МИ (треугольники), последние на графики не наносились. Несмотря на хорошее согласие расчетов МСГ и МИ функции Φ, необходимо сделать следующее замечание. На рис. 3 функция $\Phi = \Phi(p_x)$ имеет немонотонную производную. Если принять естественное предположение о монотонности $d\Phi/dp_x$, то следует сделать вывод о том, что ошибки данных расчетов Φ с помощью МСГ и МИ превышают 1%. Такой вывод следует и из численных экспериментов, показывающих, что Φ более чувствительна к погрешностям вычислений, чем A.

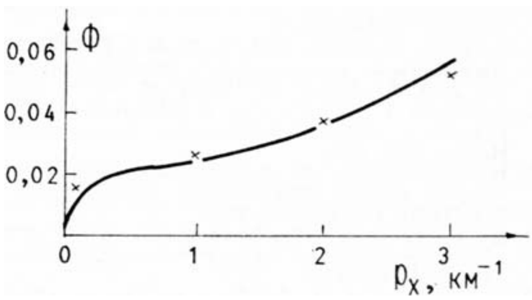

Рис. 3. Фазовая характеристика по модели II для $\eta = 0{,}997$, $\varphi = 180°$, $p_y = 0$: сплошная линия — МСГ; крестики — МИ

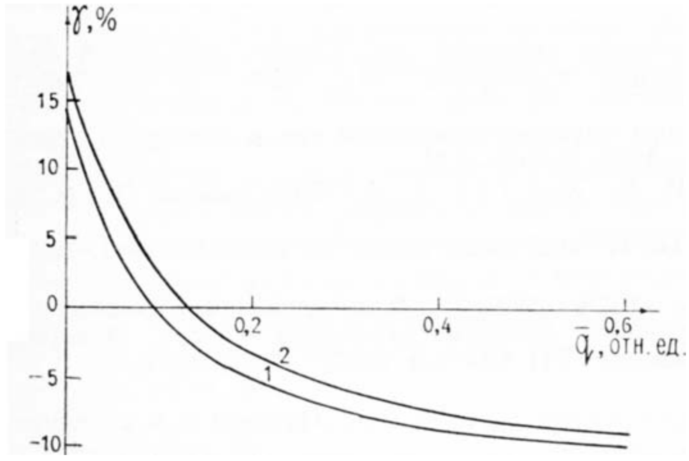

Рис. 4. Относительная погрешность МФИ$_1$ в зависимости от среднего альбедо подстилающей поверхности по модели I для $\lambda = 0{,}55$ мкм, $\theta_0 = 45°$, $\varphi = 0°$: *1* — $\eta = 0{,}997$; *2* — $\eta = 0{,}818$

Погрешность МФИ$_1$ является заметной функцией оптических характеристик атмосферы и геометрии наблюдения. Наименее точно вычисляется яркость атмосферной дымки D при $\Theta' > 30°$ и амплитудная характеристика A при $|p| > 0{,}5$ км$^{-1}$. На рис. 4 приведена относительная ошибка расчета средней яркости уходящего излучения ($\gamma = [(\bar{I}_{\text{МСГ}} - \bar{I}_{\text{МФИ}_1}) / \bar{I}_{\text{МСГ}}] \cdot 100\%$ в зависимости от среднего альбедо подстилающей поверхности. Нетрудно видеть, что ошибка МФИ$_1$ для углов наблюдения $\Theta' \lesssim 30°$ и альбедо $\bar{q} \lesssim 0{,}05$ в случаях, показанных на рис. 4, не превышает 10%. Аналогичная оценка получается и для других λ.

Заключение

В статье представлены результаты тестирования вычислительных алгоритмов решения задачи переноса излучения в атмосфере. В качестве тестовых взяты функции, определяющие действие оптического передаточного оператора атмосферы. Расчеты оптических передаточных функций атмосферы методами Монте-Карло, сферических гармоник и функции источников на базе P_1-приближения показали качественное совпадение результатов. Сравнение результатов расчетов показало, что при вычислении D, E, A_0, c_0, A, Φ метод сферических гармоник [12, 13] не уступает по точности методам Монте-Карло [17] и итераций [9], обладая существенно большим быстродействием. Приближенный МФИ$_1$ пригоден для расчетов яркости поля излучения с ошибкой $\lesssim 10\%$, если $\Theta' \lesssim 30°$ и $\bar{q} \gtrsim 0{,}05$.

1. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
2. Standard procedure to compute atmospheric radiative transfer in a scattering atmosphere /edited by J. Lenoble. Boulder, Colorado: NCAR, 1977. V. 1. 124 p.
3. Бирюков Ю.Л., Крылов Ю.В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1974. Т. 10. № 11. С. 1231–1235.
4. Karp A.H./JQSRT. 1981. V. 25. № 5. P. 403–412.
5. Численное решение задач атмосферной оптики /Под ред. М.В. Масленникова, Т.А. Сушкевич. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1984. 234 с.
6. Креков Г.М., Орлов В.М., Белов В.В. и др. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
7. Назаралиев М.А. Численное моделирование радиационных полей в атмосфере методом Монте-Карло: Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985. 30 с.
8. Джетыбаев Е.О., Мишин И.В., Мулдашев Т.З. и др. Расчет оптических передаточных характеристик атмосферы. М., 1989. 55 с. (Препринт/ИКИ АН СССР, № 1475).
9. Иолтуховский А.А., Стрелков С.А., Сушкевич Т.А. Тестовые модели численного решения уравнения переноса. М., 1988. 25 с. (Ипрепринт/ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, № 150).
10. Elterman L. UV, visible and IR attenuation for altitudes to 50 km/Report AFCRL-68-0153-Environ. Res. Papers, 1968. № 285. 60 p.
11. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 198 с.
12. Мулдашев Т.З., Султангазин У.М. //ЖВМ и МФ. Т. 26. № 6. С. 882–893.
13. Мулдашев Т.З. Метод сферических гармоник для расчета оптической пространственно-частотной характеристики атмосферы. М., 1987. 24 с. Деп. в ВИНИТИ. № 1879-В87.
14. Каргин Б.А. Космические методы изучения природной среды Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1983. С. 169–174.
15. Золотухин В.Г., Мишин И.В., Усиков Д.А. //Исследование Земли из космоса. 1984. № 4. С. 14–22.
16. Мишин И.В., Тищенко А.П. //Исследование земли из космоса. 1981. № 1. С. 48–57.
17. Джетыбаев Е.О. Алгоритмы статистического моделирования в задаче дистанционного оптического зондирования системы атмосфера–океан. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983. 12 с.

Институт математики и механики АН КазССР,
Алма-Ата
Всесоюзный научно-технический информационный центр,
Москва

Поступила в редакцию
23 января 1989 г.

E.O. Dzhetibaev, T.Z. Muldashev, I.V. Mishin. **Calculation of Optical Transfer Functions of the Atmosphere.**

The calculational data on the atmospheric optical transfer functions have been obtained by spherical harmonics, Monte-Carlo, source functions and iteration methods are compared. The calculations have been carried out using atmospheric models.