

С.В. Афонин, В.В. Белов, И.Ю. Макушкина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯННОГО АЭРОЗОЛЕМ ВОСХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ. Ч. 1. ФУНКЦИЯ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ

Рассмотрены результаты моделирования функции размытия точки (ФРТ) в ИК-диапазоне спектра для различных оптико-геометрических условий наблюдения. Исследованы зависимости ФРТ от расстояния до точки наблюдения, азимутального и зенитного углов наблюдения, содержания аэрозоля в приземном слое и стратосфере.

### 1. Введение

Ранее в [1–3] нами исследованы некоторые закономерности формирования рассеянного аэрозолем восходящего теплового излучения в спектральных диапазонах  $3 \div 5$  и  $8 \div 13$  мкм, получены оценки влияния однократного и многократного рассеяния, а также бокового подсвещения на интенсивность рассеянного излучения и установлена зависимость интенсивности от оптических параметров аэрозоля и метеопараметров атмосферы.

Анализ характеристик бокового подсвещения (обусловленного процессом рассеяния в направлении приемного устройства теплового излучения участков земной поверхности, не попадающих в поле зрения прибора) позволил сделать вывод о возможности заметного влияния (более  $0,5 \div 1^\circ$ ) поверхностных температурных неоднородностей на точность атмосферной коррекции результатов спутниковых измерений температуры подстилающей поверхности в условиях замутненной атмосферы. Этот результат стал причиной продолжения исследований, направленных на установление закономерностей, связывающих параметры температурных неоднородностей на поверхности и интенсивности рассеянного аэрозолем теплового излучения.

Данная статья посвящена изложению результатов расчета функции размытия точки (ФРТ), являющейся наиболее удобным инструментом для проведения исследований по этой проблеме на основе имитационного моделирования. К сожалению, необходимый для таких исследований объем данных об ФРТ в ИК-диапазоне спектра, как нам известно, в литературе отсутствует.

В статье подробно представлены результаты расчетов, которые описывают пространственно-угловую структуру ФРТ для различных оптико-геометрических ситуаций.

### 2. Основные характеристики моделирования

Результатами моделирования являлись следующие характеристики. Интенсивность  $J_\lambda$  и радиационная температура  $T_\lambda$  собственного излучения системы «атмосфера–подстилающая поверхность» (А–ПП):

$$J_\lambda = J_\lambda^0 + J_\lambda^{\text{MS}}; \quad T_\lambda = B_\lambda^{-1} [J_\lambda],$$

$$J_\lambda^0 = J_{\text{ATM}}^0 + J_{\text{SURF}}^0; \quad J_\lambda^{\text{MS}} = J_{\text{ATM}}^{\text{MS}} + J_{\text{SURF}}^{\text{MS}},$$

$$J_{\text{SURF}}^0 = B_\lambda [T_s(x_0, y_0)] \exp(-\tau(\theta)),$$

$$J_{\text{SURF}}^{\text{MS}} = \int_S \int h_\lambda(x, y, \theta, \tau_{\text{SC}}) B_\lambda [T_s(x, y)] dx dy,$$

где  $J_{\text{ATM}}^0$ ,  $J_{\text{SURF}}^0$ ,  $J_{\text{ATM}}^{\text{MS}}$ ,  $J_{\text{SURF}}^{\text{MS}}$  – соответствующие вклады атмосферы и подстилающей поверхности в интенсивность нерассеянного и рассеянного излучений;  $(x_0, y_0)$  – координаты точки зондирования;  $\theta$  – зенитный угол наблюдения;  $\tau$  – оптическая толщина ослабления атмосферы;  $\tau_{\text{SC}}$  – оптическая

толщина аэрозольного рассеяния;  $B_\lambda$  – функция Планка;  $B_\lambda^{-1}$  – обратная функция Планка;  $T_s$  – температура подстилающей поверхности;  $h_\lambda(x, y, \theta, \tau_{sc})$  – функция размытия точки;  $S$  – эффективная пространственная область формирования бокового подсвета [2].

Функция размытия точки была рассчитана с помощью метода локальной оценки на сопряженных траекториях [4]. Для удобства вычисления этой функции проводилось в координатах  $(r, \varphi)$ , где  $r$  – расстояние по поверхности Земли от точки зондирования до произвольной точки  $(x, y)$ ;  $\varphi$  – азимутальный угол. При расчете  $J_{atm}^{MS}$  как и в [1–3], использовался алгоритм прямого моделирования на сопряженных траекториях. Погрешность определения радиационной температуры при этом составила менее  $0,05^\circ$ .

Диапазон расстояний  $r$  для проведения моделирования по методу локальной оценки выбирался из соображений оптимизации объема сложных вычислений, устойчивости алгоритма при малых значениях  $r$  и на основе результатов расчета радиусов бокового подсвета [2, 3]. Вследствие этого диапазон значений  $r$  составил  $0,01 \div 10$  км в случае приземного аэрозоля и  $0,1 \div 100$  км – в случае поствулканического. Для вычисления ФРТ при  $r < r_{min}$  использовались результаты прямого моделирования  $J_\lambda^{MS}$ .

Наряду с  $h_\lambda(r, \varphi, \theta, \tau_{sc})$  рассчитывалась функция  $h_\lambda^*(\varphi, \theta, \tau_{sc})$  («интегральная» ФРТ)

$$h_\lambda^*(\varphi, \theta, \tau_{sc}) = \int_0^{R_{max}} h_\lambda(r, \varphi, \theta, \tau_{sc}) r dr,$$

где  $R_{max}$  – радиус бокового подсвета для заданной точности моделирования радиационной температуры.

### 3. Оптико-геометрические условия моделирования

В [1–3] был рассмотрен широкий спектр вариаций оптико-метеорологических параметров атмосферы. Представленные в этих работах результаты позволяют при исследовании зависимости ФРТ от оптико-геометрических параметров  $(r, \varphi, \theta, \tau_{sc})$  использовать одну метеомодель атмосферы (лето средних широт), для которой наличие значительных поверхностных температурных неоднородностей является достаточно частым явлением. Выбор аэрозольных моделей осуществлялся из соображений проведения исследований в максимальном диапазоне изменчивости значений  $\tau_{sc}$ .

Моделирование проводилось для следующих оптико-геометрических условий наблюдения:  
 спектральные диапазоны . . . . .  $3,55 \div 3,95$  мкм ( $\lambda = 3,75$  мкм) и  $10,3 \div 11,3$  мкм ( $\lambda = 10,8$  мкм);  
 углы наблюдения . . . . .  $\theta = 0, 30, 45$  и  $55^\circ$ ;  
 высота наблюдения . . . . . 800 км;  
 атмосфера . . . . . безоблачная молекулярно-аэрозольная, сферически-симметричная, вертикально-неоднородная;  
 метеомодель атмосферы . . . . . лето средних широт;  
 аэрозольные модели . . . . . морской (maritime) тип аэрозоля в приземном слое атмосферы 0–2 км (дальность видимости  $S_M = 2 \div 50$  км) и фоновое содержание аэрозоля в тропосфере. Для поствулканической ситуации использовалась модель fresh volcanic extinction с умеренным (moderate), высоким (high) и экстремальным (extreme) содержанием аэрозоля в стратосфере при отсутствии аэрозоля в приземном слое.

Вертикальные профили метеорологических параметров атмосферы, коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления (рассеяния), альbedo однократного рассеяния, индикаторы аэрозольного рассеяния были получены на основе данных, используемых в программном комплексе LOWTRAN-7 [5]. На рис. 1 представлены данные, характеризующие выбранные нами для расчетов оптико-метеорологические модели атмосферы.

### 4. Результаты моделирования

Проанализируем свойства функции размытия точки  $h_\lambda(r, \varphi, \theta, \tau_{sc})$  в зависимости от расстояния  $r$ , азимутального угла  $\varphi$ , зенитного угла наблюдения  $\theta$  и оптической толщины аэрозольного рассеяния  $\tau_{sc}$ . Расчетные данные представлены на рис. 2–4. Для большей наглядно-

сти результаты расчетов ФРТ в случае приземного аэрозоля приведены на рис. 2 только для  $r < 1$  км – пространственной области, которая вносит доминирующий вклад в интенсивность бокового подсвета [2].

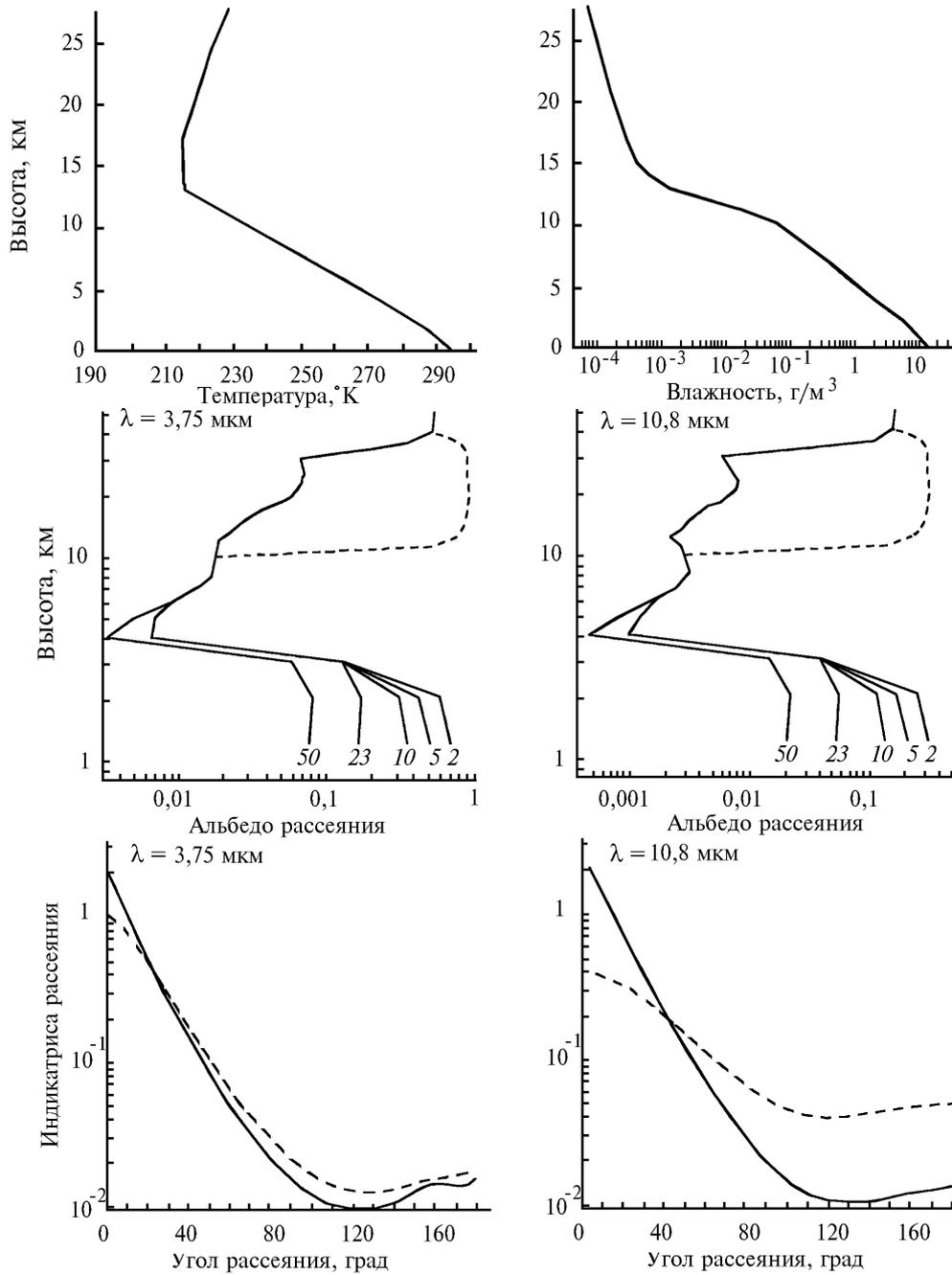


Рис. 1. Вертикальные профили температуры и влажности для лета средних широт. Вертикальные профили альbedo однократного рассеяния при различной дальности видимости (2 ÷ 50 км) в приземном слое, при фоновом и поствулканическом (штриховая кривая) содержании аэрозоля в стратосфере. Угловой ход индикатрисы рассеяния: сплошные кривые – приземный аэрозоль, штриховые кривые – стратосферный

#### 4.1. Приземный аэрозоль (рис. 2, 4)

В рассмотренном для этого случая диапазоне расстояний  $r \approx 0,01 \div 10$  км функция  $h(r)$  монотонно и быстро убывает с ростом  $r$  (рис. 2). Величина  $\partial h(r)/\partial r$  зависит от значений  $\tau_{\text{сст}}$ ,  $\theta$  и  $\varphi$ . В частности,  $|\partial h(r)/\partial r|$  уменьшается с увеличением  $\theta$ .

Зависимость ФРТ от азимутального угла  $h(\varphi)$  для случая приземного аэрозоля (рис. 2) имеет следующие характерные особенности при  $r < 1$  км:

- наличие минимума при значениях азимута  $\varphi = \varphi_{\min} \simeq 60-75^\circ$ ;
- наличие слабого максимума при значениях  $\varphi \simeq 10-20^\circ$ ;
- незначительное изменение функции в диапазоне  $\varphi = 0^\circ - \varphi_{\min}$ ;
- значительное (в несколько раз) увеличение  $h(\varphi)$  при росте значений  $\varphi > \varphi_{\min}$ ;
- рост  $|\partial h(\varphi)/\partial \varphi|$  с увеличением  $\theta$ .

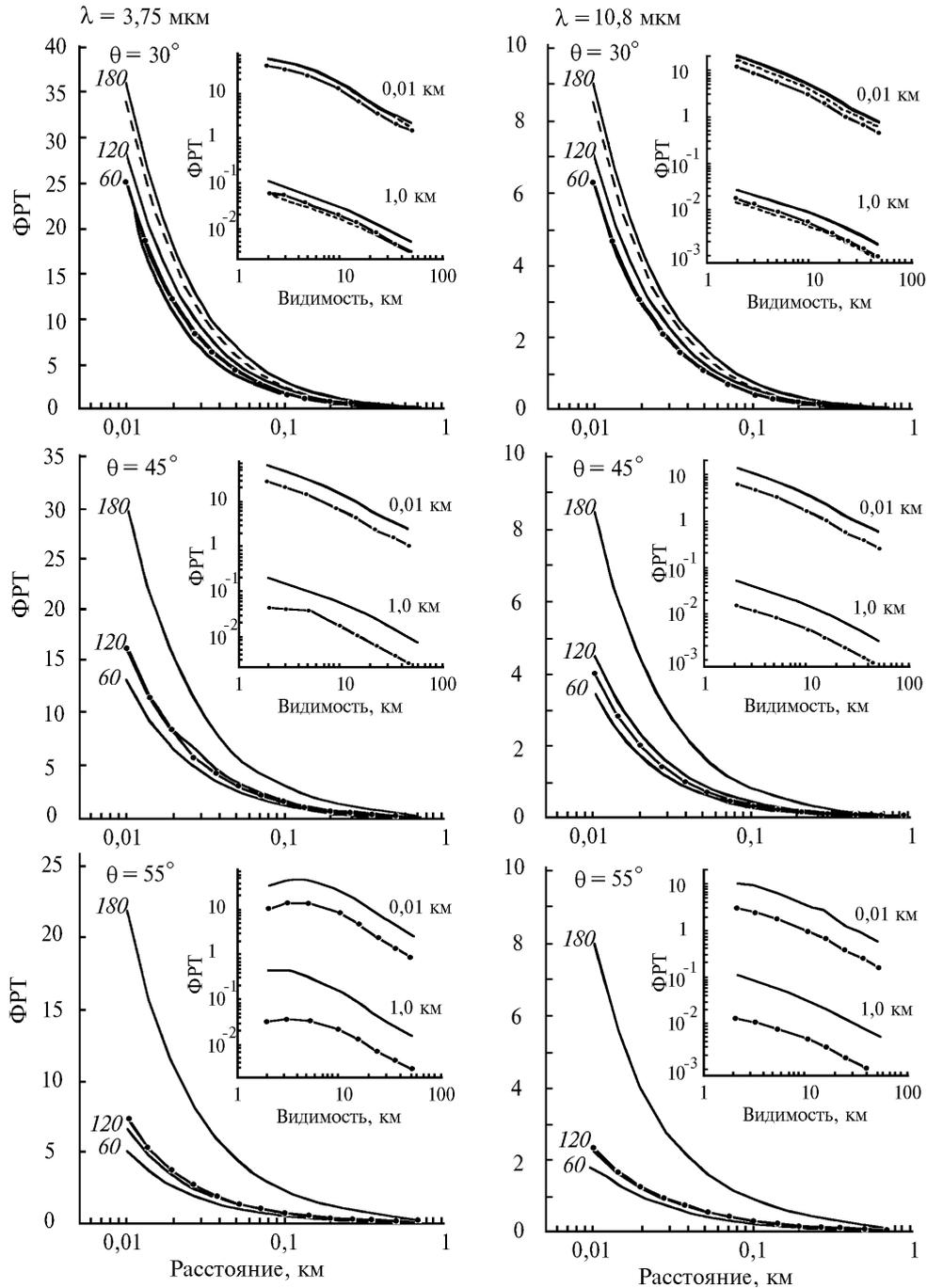


Рис. 2. Функция размытия  $h(r, \varphi)$  в случае приземного аэрозоля ( $S_M = 5$  км) для азимутов  $\varphi = 0, 60, 120, 180^\circ$  и зенитных углов наблюдения  $\theta = 30, 45, 55^\circ$ . На встроенных рисунках – зависимость  $h(r, \varphi)$  от дальности видимости для  $r = 0,01$  и  $1$  км,  $\varphi = 0$  и  $180^\circ$ . Кривые с точками –  $\varphi = 0^\circ$ , штриховые кривые –  $\varphi = 180^\circ$

Кроме того, следует отметить еще одну особенность поведения  $h(\varphi)$  при  $r > 1$  км: с ростом  $r$  положение минимума смещается в область значений  $\varphi_{\min} \approx 90 \div 120^\circ$ . При этом величина смещения растет с увеличением оптической толщины и уменьшением зенитного угла наблюдения.

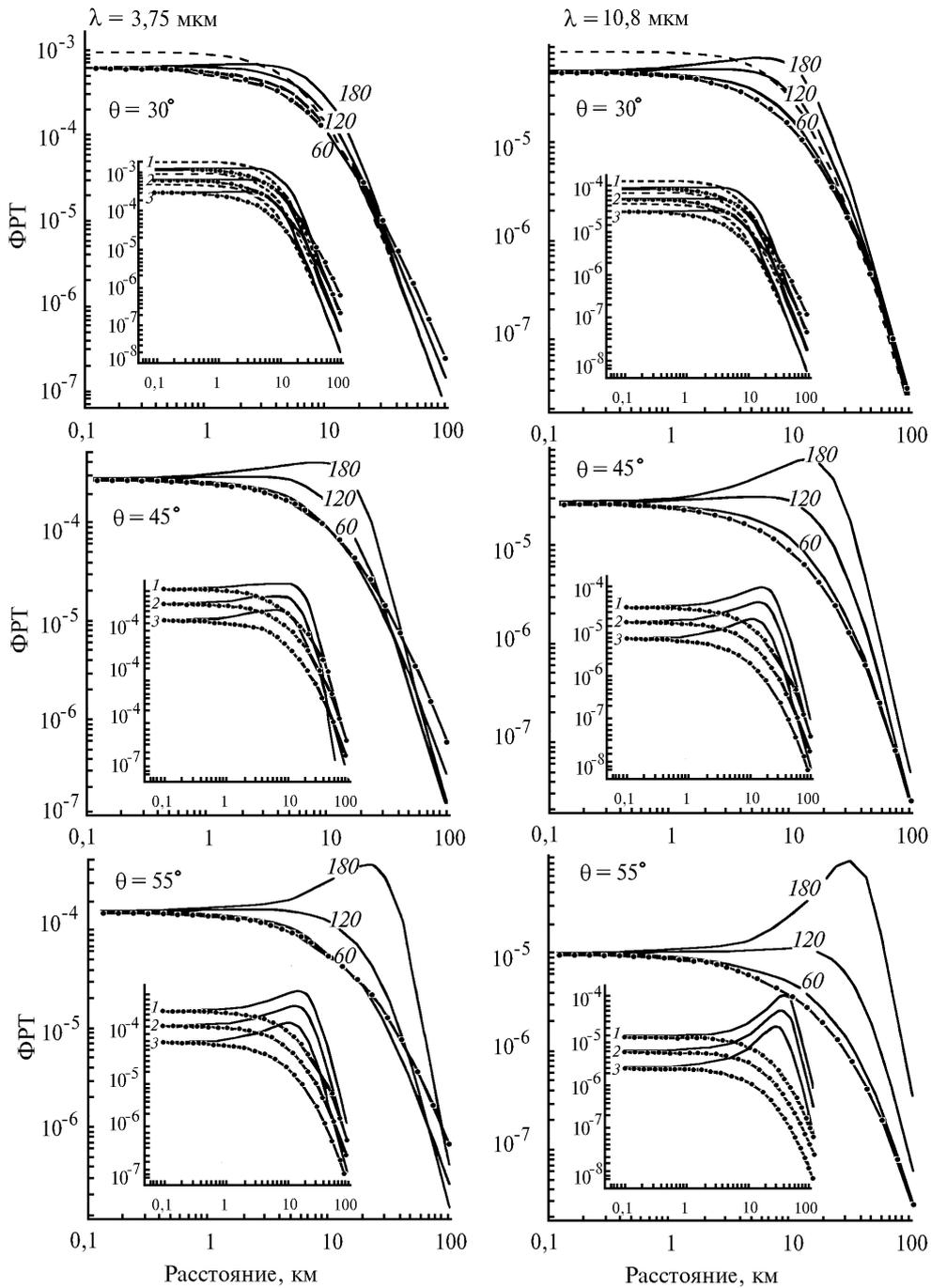


Рис. 3. Функция размытия  $h(r, \varphi)$  в случае высокого (high) содержания поствулканического стратосферного аэрозоля для азимутов  $\varphi = 0, 60, 120, 180^\circ$  и зенитных углов наблюдения  $\theta = 30, 45, 55^\circ$ . На встроенных рисунках – функция  $h(r, \varphi)$  при экстремальном (1), высоком (2) и умеренном (3) содержании поствулканического аэрозоля в стратосфере для  $\varphi = 0$  и  $180^\circ$ . Кривые с точками –  $\varphi = 0^\circ$ , штриховые кривые –  $\theta = 0^\circ$

Наглядное представление об этих особенностях позволяют получить приведенные на рис. 4 данные об азимутальной зависимости нормированной на единицу «интегральной» ФРТ  $h^*(\varphi)$ . Сравнивая данные рис. 4 и представленную на рис. 1 зависимость индикатрисы от угла

рассеяния  $P(\varphi^*)$ , можно отметить сходство их поведения для смежных углов  $\varphi$  и  $180^\circ - \varphi^*$ , а также хорошее совпадение углового хода и значений функций  $h^*(\varphi)$  для условий высокой и низкой прозрачности атмосферы.

Зависимость ФРТ от зенитного угла наблюдения  $h(\theta)$  имеет две характерные особенности:  $\partial h(\theta)/\partial \theta < 0$  в диапазоне  $r < r_1$  и  $\partial h(\theta)/\partial \theta > 0$  в диапазоне  $r > r_2$ . Значения  $r_1$  и  $r_2$  меняются при различных оптико-геометрических условиях наблюдения. При этом наиболее ярко проявляется зависимость  $r_1$  и  $r_2$  от азимутального угла. Она характеризуется максимальными значениями пар  $r_1$  и  $r_2$  при  $\varphi \approx \varphi_{\min}$  и их минимальными значениями при  $\varphi = 180^\circ$ . В целом значение  $r_1$  не превышает 1–5 км (для различных значений  $\varphi$  и  $\tau_{SC}$ ), а значение  $r_2$  лежит в диапазоне больше  $0,2 \div 1$  км.

Зависимость ФРТ от дальности видимости  $S_M$  имеет следующие характерные особенности:  
с увеличением  $S_M$  функция  $h(S_M)$  монотонно убывает;  
с ростом зенитного угла наблюдения при низких значениях  $S_M < 5$  км для  $\lambda = 3,75$  мкм усиливается тенденция к нарушению монотонности функции  $h(S_M)$ .

Эти особенности поведения зависимости  $h(S_M)$  наглядно иллюстрируются встроенными графиками рис. 2. Сходные по виду зависимости были получены нами в [2] для функции  $F(r)$ . Там же предложено объяснение подобного поведения этой функции при низких значениях  $S_M$ .

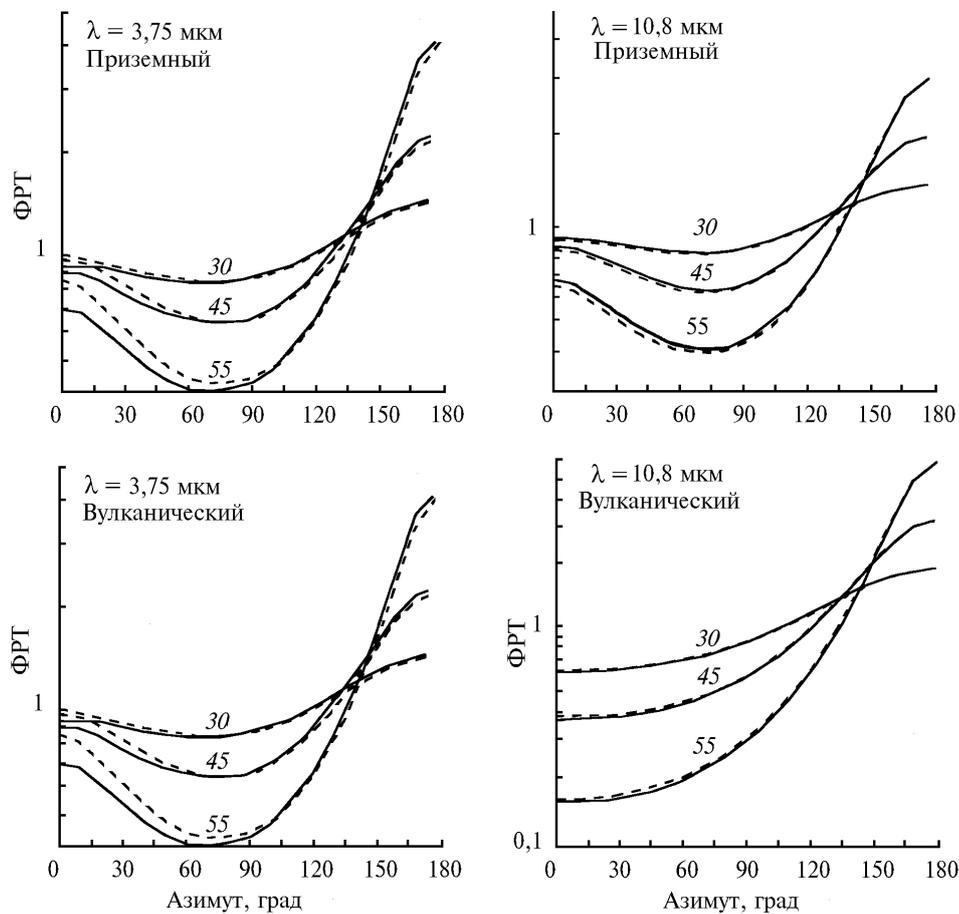


Рис. 4. Функция  $h^*(\varphi)$  для случаев приземного и стратосферного аэрозоля при различных зенитных углах наблюдения  $\theta = 30, 45, 55^\circ$ . Приземный аэрозоль  $S_M = 5$  и 23 км (сплошная и штриховая кривые соответственно). Стратосферный аэрозоль: экстремальное (extreme) и умеренное (moderate) содержание (сплошная и штриховая кривые соответственно)

#### 4.2. Поствулканический аэрозоль (рис. 3, 4)

В рассмотренном для этого случая диапазоне расстояний  $r \approx 0,1 \div 100$  км при  $\varphi < 100 \div 120^\circ$  зависимость  $h(r)$  описывается монотонно убывающей с ростом  $r$  функцией (рис. 3).

Однако с увеличением  $\varphi$  при  $\theta > 0^\circ$  у функции  $h(r)$  появляется четко выраженный максимум, положение которого ( $r_{\max}$ ) и высота ( $h_{\max}$ ) зависят от  $\varphi$ ,  $\theta$  и  $\tau_{\text{SC}}$ . В частности, рост этих параметров приводит к увеличению  $r_{\max}$ , достигающих для  $\varphi = 180^\circ$ ,  $\theta = 55^\circ$  значений порядка  $15 \div 30$  км. Эти особенности функции  $h(r)$  наиболее наглядно иллюстрируются встроенными графиками рис. 3.

Азимутальная зависимость ФРТ имеет следующие особенности:  $\partial h(\varphi)/\partial \varphi > 0$  при расстояниях  $r < r^*$ ; величина  $|\partial h(\varphi)/\partial \varphi|$  растет с увеличением  $\theta$ . Значения  $r^*$  лежат в диапазоне  $5 \div 10$  км для  $\lambda = 3,75$  мкм и  $30 \div 70$  км для  $\lambda = 10,8$  мкм.

На рис. 4 представлены данные об азимутальной зависимости «интегральной» ФРТ для этого типа аэрозоля. Сравнивая вид функции  $h^*(\varphi)$  и угловой ход индикатрисы рассеяния, можно заметить, как и раньше, сходство их поведения. Можно отметить также идентичность угловой зависимости и хорошее совпадение значений  $h^*(\varphi)$  для различных  $\tau_{\text{SC}}$ .

Зависимость функции размытия точки от зенитного угла наблюдения, как и в случае приземного аэрозоля, имеет те же характерные особенности:  $\partial h(\theta)/\partial \theta < 0$  в диапазоне  $r < r_1$  и  $\partial h(\theta)/\partial \theta > 0$  в диапазоне  $r > r_2$ . Однако в отличие от случая приземного аэрозоля величина  $r_2$  монотонно убывает с ростом азимутального угла. Диапазоны значений  $r_1$  составили  $5 \div 20$  км ( $\lambda = 3,75$  мкм) и  $5 \div 60$  км ( $\lambda = 10,8$  мкм), а значения  $r_2$  превышают  $15 \div 30$  км.

Зависимость ФРТ от оптической толщины иллюстрируется встроенными графиками рис. 3, которые наглядно демонстрируют увеличение значений ФРТ с ростом  $\tau_{\text{SC}}$  для всего диапазона изменения  $\theta$  и  $\varphi$ .

## 5. Заключение

Обобщая закономерности поведения ФРТ в зависимости от оптико-геометрических параметров  $r$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\tau_{\text{SC}}$ , следует отметить ее неоднозначный, сложный для построения удобных аппроксимаций характер. Тем не менее на основании свойств функции  $h^*(\varphi)$  и данных о степени влияния вариаций оптико-метеорологических параметров на характеристики бокового подсвета [1–3] можно сделать следующий важный практический вывод. Для достаточно широкого диапазона изменчивости метеопараметров атмосферы и оптических параметров аэрозольного рассеяния допускается при заданных значениях  $\varphi$  и  $\theta$  использовать в целях атмосферной коррекции «универсальный» набор данных при различных условиях замутненности атмосферы.

Для оценки справедливости этого вывода в дальнейшем планируется провести на основе имитационного моделирования дополнительные исследования. Однако нами уже получены предварительные данные для простейшего случая существования линии раздела области бокового подсвета на два участка с разными температурами  $T_1$  и  $T_2$ . В этом случае даже при градиенте температур порядка  $20^\circ$  использование ФРТ, относящейся к условиям максимальной замутненности атмосферы, приводит при ее использовании для меньших значений  $\tau_{\text{SC}}$  к максимальной погрешности расчета  $T_\lambda$  не более  $0,5^\circ$  (приземный аэрозоль,  $\varphi = 180^\circ$ ,  $\theta = 55^\circ$ ,  $\lambda = 3,75$  мкм). Данный результат хорошо согласуется с нашим выводом.

1. Афонин С. В., Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 6. С. 797–809.
2. Афонин С. В., Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 6. С. 810–817.
3. Афонин С. В., Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 6. С. 818–827.
4. Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Теория и приложения статистического моделирования. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988. С. 153–164.
5. Kneizys F. X. et al. Users Guide to LOWTRAN 7. AFGL-TR-88-0177. ERP, N 1010. AFGL. Hansom AFB. MA 01731.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
30 декабря 1994 г.

S. V. Afonin, V. V. Belov, I. Ju. Makushkina. **Simulation of Upgoing Thermal Radiation Scattered by Aerosol Allowing for Temperature Inhomogeneities on a Surface. I. Point Spread Function.**

Results of simulation of point spread function (PSF) within IR spectral range are examined in the paper for different optical-geometric conditions of observation. The PSF is treated as a function of the distance from the observation point, azimuth and zenith angles, and aerosol content in near-ground atmosphere and in stratosphere.