

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_λ и радиационная температура T_λ 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_{ATM}^0 , J_{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; θ – зенитный угол наблюдения; τ – оптическая толщина ослабления атмосферы; τ_{SC} – оптическая

толщина аэрозольного рассеяния; B_λ – функция Планка; B_λ^{-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, φ) , где r – расстояние по поверхности Земли от точки зондирования до произвольной точки (x, y) ; φ – 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_λ^{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 τ_{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° ;
 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 φ , зенитного угла наблюдения θ и оптической толщины аэрозольного рассеяния τ_{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].

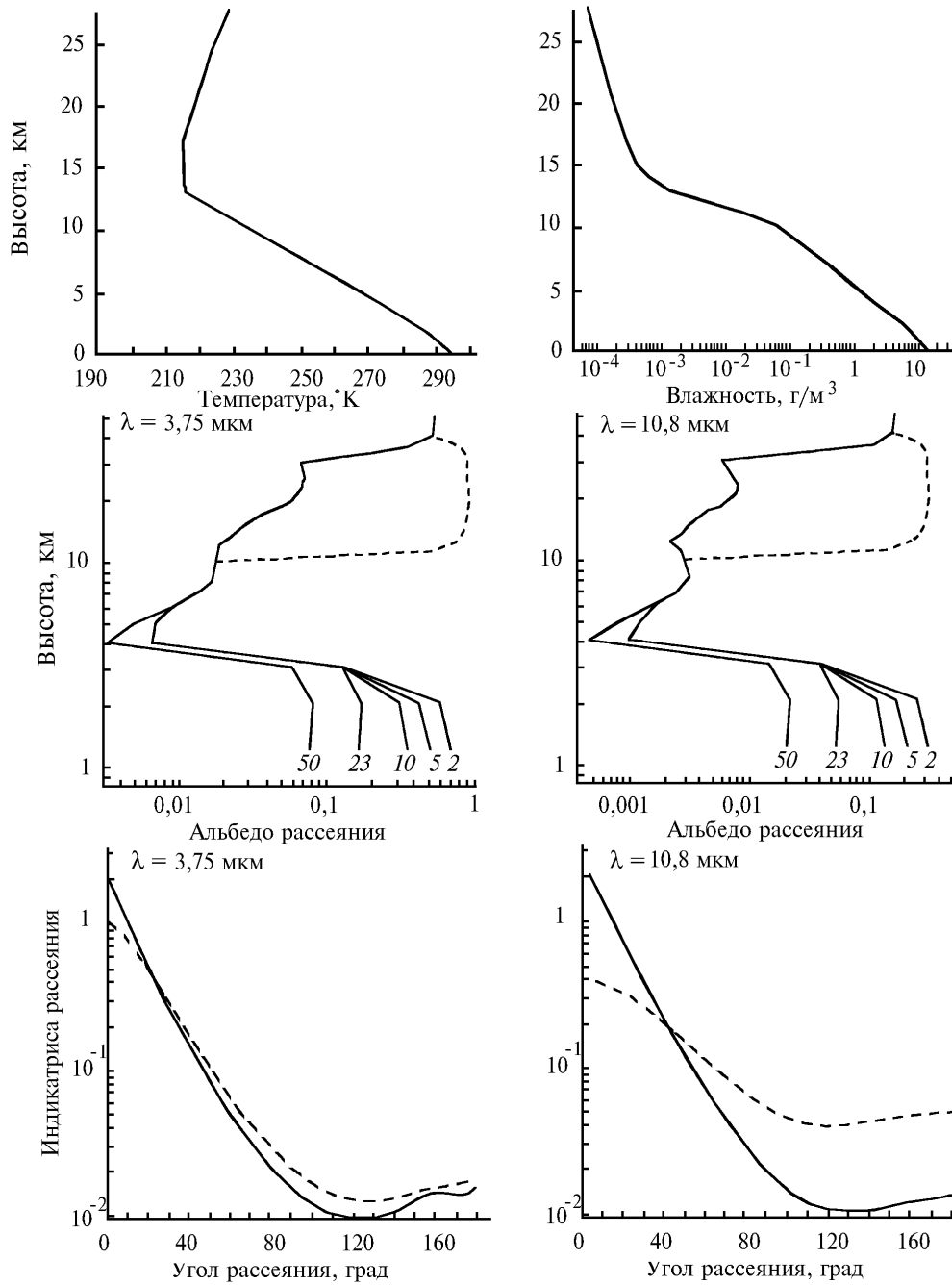


Рис. 1. Вертикальные профили температуры и влажности для лета средних широт. Вертикальные профили альbedo однократного рассеяния при различной дальности видимости (2 ÷ 50 км) в приземном слое, при фоновом и поствулканическом (штриховая кривая) содержании аэрозоля в стратосфере. Угловой ход индикатрисы 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 $\tau_{\text{сст}}$, θ и φ . В частности, $|\partial h(r)/\partial r|$ уменьшается с увеличением θ .

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 θ .

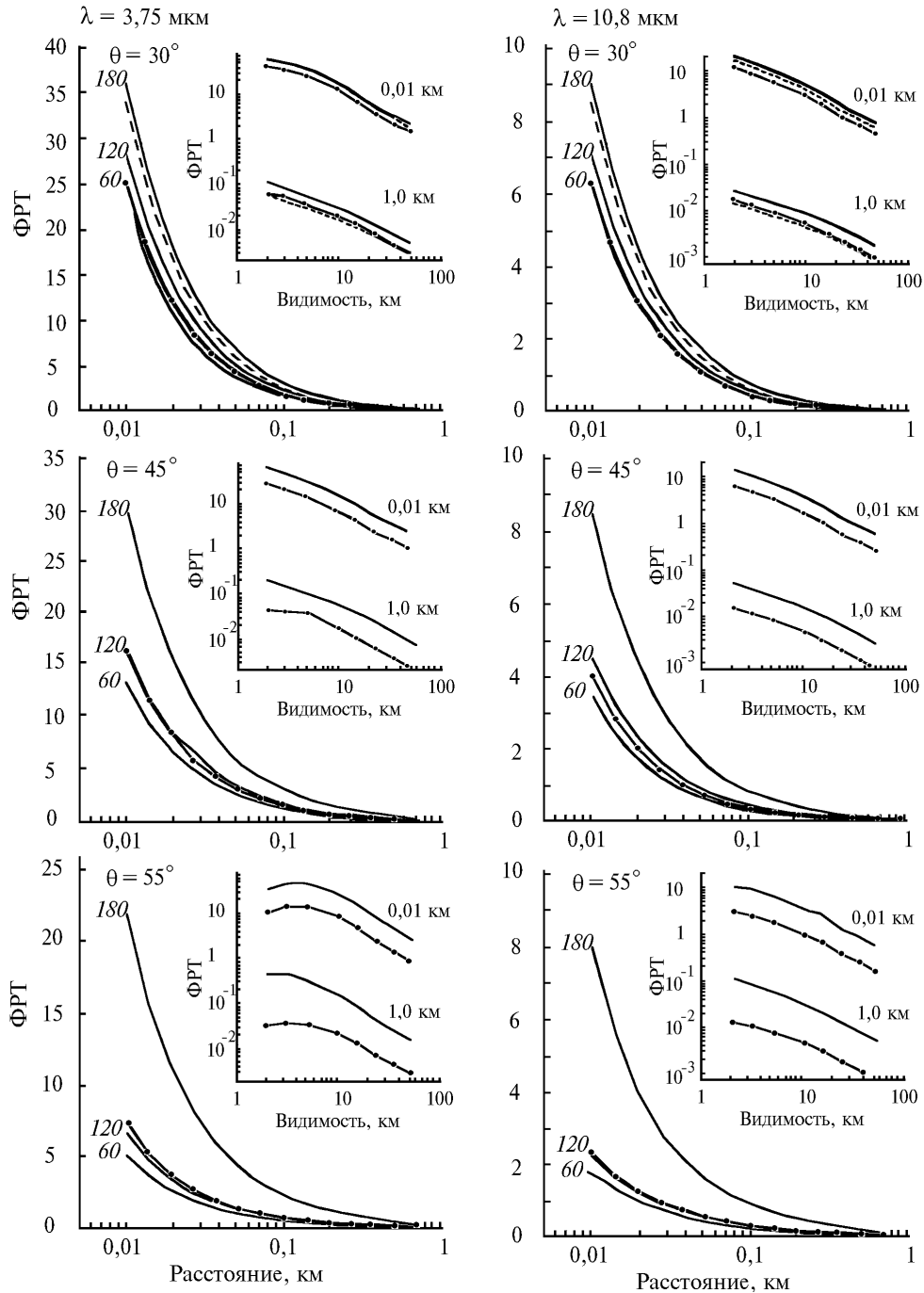


Рис. 2. Функция размытия $h(r, \varphi)$ в случае приземного аэрозоля ($S_M = 5$ км) для азимутов $\varphi = 0, 60, 120, 180^\circ$ и зенитных углов наблюдения $\theta = 30, 45, 55^\circ$. На встроенных рисунках – зависимость $h(r, \varphi)$ от дальности видимости для $r = 0,01$ и 1 км, $\varphi = 0$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

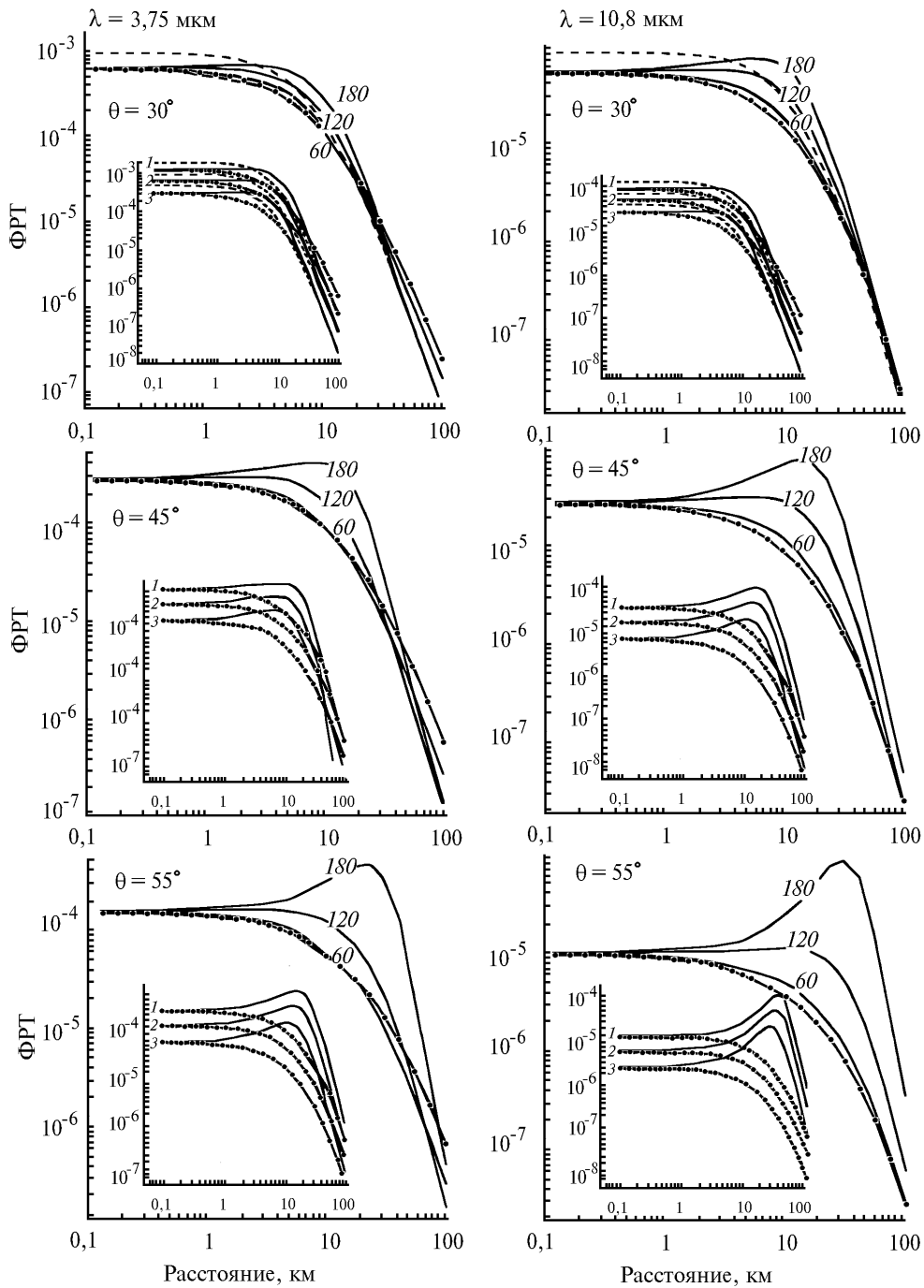


Рис. 3. Функция размытия $h(r, \varphi)$ в случае высокого (high) содержания поствулканического стратосферного аэрозоля для азимутов $\varphi = 0, 60, 120, 180^\circ$ и зенитных углов наблюдения $\theta = 30, 45, 55^\circ$. На встроенных рисунках – функция $h(r, \varphi)$ при экстремальном (1), высоком (2) и умеренном (3) содержании поствулканического аэрозоля в стратосфере для $\varphi = 0$ и 180° . 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 φ 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 $\varphi \simeq \varphi_{\min}$ и их минимальными значениями при $\varphi = 180^\circ$. В целом значение r_1 не превышает 1–5 км (для различных значений φ и τ_{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 .

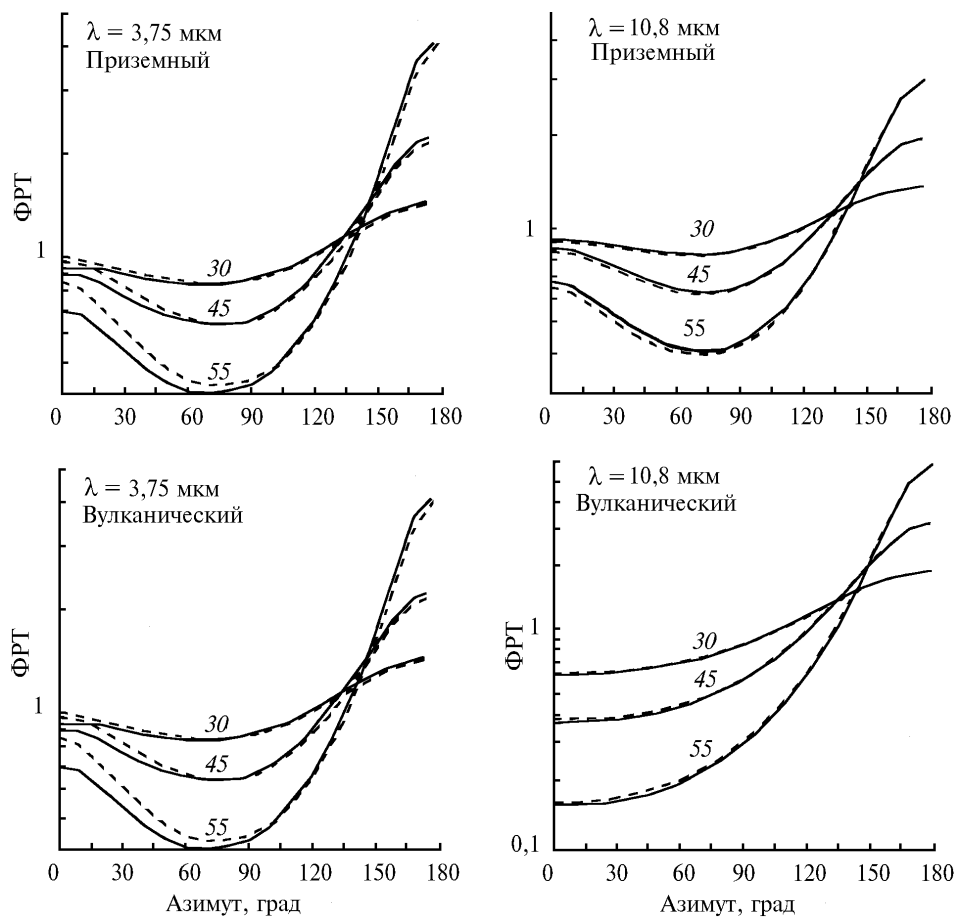


Рис. 4. Функция $h^*(\varphi)$ для случаев приземного и стратосферного аэрозоля при различных зенитных углах наблюдения $\theta = 30, 45, 55^\circ$. Приземный аэрозоль $S_M = 5$ и 23 км (сплошная и штриховая кривые соответственно). Стратосферный аэрозоль: экстремальное (extreme) и умеренное (moderate)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

4.2. Поствулканический аэрозоль (рис. 3, 4)

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

Однако с увеличением φ при $\theta > 0^\circ$ у функции $h(r)$ появляется четко выраженный максимум, положение которого (r_{\max}) и высота (h_{\max}) зависят от φ , θ и τ_{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 θ . 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 τ_{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 τ_{SC} для всего диапазона изменения θ и φ .

5. Заключение

Обобщая закономерности поведения ФРТ в зависимости от оптико-геометрических параметров r , φ , θ , τ_{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 φ и θ 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° использование ФРТ, относящейся к условиям максимальной замутненности атмосферы, приводит при ее использовании для меньших значений τ_{SC} к максимальной погрешности расчета T_λ 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.