

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА РАСSEЯННОГО АЭРОЗОЛЕМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТЬ 2. РАДИУС БОКОВОГО ПОДСВЕТА

Исследованы пространственные характеристики восходящего потока рассеянного аэрозолем теплового излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Проведено сравнение радиуса бокового подсвета с пространственным разрешением современных приборов спутникового ИК-зондирования подстилающей поверхности.

### 1. Введение

В [1] нами были рассмотрены результаты исследования структуры и интенсивности восходящего потока рассеянного аэрозолем теплового излучения атмосферы и подстилающей поверхности в области 3,5–4 мкм и 10,3–11,3 мкм. В частности, показан доминирующий вклад поверхности в интенсивность потока. Очевидно, что закономерным продолжением этих исследований является изучение пространственных характеристик, описывающих формирование потока, а именно, радиуса бокового подсвета («*adjacency effect*») [2] – эффективного размера участка поверхности, учет излучения которого достаточен для вычисления с требуемой точностью радиационной температуры  $T_\lambda$  системы «атмосфера – подстилающая поверхность» (А–ПП).

В данной статье проведен анализ результатов оценки радиусов бокового подсвета для различных оптико-геометрических условий наблюдения в диапазоне точности расчета радиационной температуры порядка  $0,5 \div 1^\circ$ , при выборе которого мы ориентировались на приложение полученных данных к задаче дистанционного определения температуры подстилающей поверхности.

### 2. Основные характеристики моделирования

В работе [1] для расчета интенсивности потока рассеянной радиации  $J_\lambda^{MS}$  использовался алгоритм прямого моделирования по сопряженным траекториям, в рамках которого осуществлялось разделение вкладов подстилающей поверхности ( $J_{SURF}^{MS}$ ) и атмосферы ( $J_{ATM}^{MS}$ ). Этот же алгоритм был использован нами для оценки величин  $J_{SURF}^{MS}(R)$ , сформированных участками подстилающей поверхности с радиусом  $R$ . Очевидно, что с ростом  $R$  значение  $J_{SURF}^{MS}(R)$  стремится к  $J_{SURF}^{MS}$ . Наряду с этим проводилась оценка пространственной характеристики:

$$F(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial J_{SURF}^{MS}(r)}{\partial r},$$

где  $r$  – расстояние от точки зондирования.

Величина  $F(r)$  описывает пространственную плотность рассеянного аэрозолем излучения подстилающей поверхности и характеризует вклад в интенсивность рассеянного потока (при нормировке на  $J_{SURF}^{MS}$  – относительный вклад) излучения участков поверхности единичной площади, удаленных на расстояние  $r$  от точки зондирования.

Величина радиуса бокового подсвета для заданного уровня точности вычисления радиационной температуры ( $\delta T_\lambda$ ) определялась на основе интерполяционного массива значений температур  $T_\lambda(R)$ . Расчетная схема предусматривала для этих целей разбиение подстилающей поверхности на круговые области различных радиусов с шагом  $\Delta R \sim 1$  км и общим центром в точке пересечения оси визирования с поверхностью. Шаг разбиения выбирался так, чтобы обеспечить удовлетворительную точность (не менее 100 м) определения радиуса бокового подсвета на основе

линейной интерполяции величин  $T_\lambda(R)$ . Вычислив интерполяционный массив значений  $T_\lambda(R)$  и задав точность расчета радиационной температуры  $0,1^\circ \leq \delta T_\lambda \leq 1^\circ$ , далее из условия:

$$T_\lambda - T_\lambda(R) = \delta T_\lambda$$

можно определить значение эффективного размера (радиуса)  $R$  участка поверхности, учет излучения которого обеспечивает выбранный уровень  $\delta T_\lambda$ .

### 3. Оптико-геометрические условия моделирования

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* –  $\varphi = 0$  и  $45^\circ$ ; *высота наблюдения* 800 км. *Метеомодели атмосферы* – тропики, лето и зима средних широт, арктическое лето, стандартная модель US-1976. *Аэрозольные модели* – морской, континентальный и городской тип аэрозоля (дальность видимости  $S_M = 2 \div 50$  км). *Подстилающая поверхность* – пространственно-однородная, ламбертовская, излучающая по закону абсолютно черного тела с температурой в диапазоне  $T_S = 272,2 - 299,7$  К. Более подробное описание оптико-метеорологических моделей и их иллюстрация приведены в [1].

### 4. Результаты моделирования

Результаты оценок радиуса бокового подсвета представлены на рис. 1 – 3 и в таблице.

**Максимальные значения радиусов бокового подсвета и максимальный диапазон их сезонных вариаций (случай многократного рассеяния)**

Тип аэрозоля	$S_M$ , км	$\varphi = 0^\circ$			$\varphi = 45^\circ$		
		Точность ( $\delta T_\lambda$ )			Точность ( $\delta T_\lambda$ )		
		1	0,5	0,1	1	0,5	0,1
<b><math>\lambda = 3,75</math> мкм</b>							
Морской	2	1,823	2,730	6,036	3,013	4,417	8,808
	5	1,119	1,881	5,033	2,370	3,697	8,906
	10	0,891	1,467	4,032	1,774	2,902	8,086
	23	0,492	0,887	2,868	0,853	1,816	5,834
	диапазон вариации	0,317	0,555	1,252	0,604	0,874	2,554
Континентальный	2	0,840	0,991	2,900	1,393	2,152	6,019
	5	0,497	0,830	1,987	0,817	1,469	4,464
	10	0,001	0,582	1,623	0,373	0,917	3,406
	23	0,001	0,001	0,966	0,001	0,186	2,175
	диапазон вариации	0,080	0,091	0,367	0,275	0,304	1,432
Городской	2	0,668	0,896	1,992	0,855	1,401	3,442
	5	0,216	0,680	1,658	0,497	0,917	2,973
	10	0,001	0,329	1,188	0,001	0,644	2,476
	23	0,001	0,001	0,848	0,001	0,001	1,634
	диапазон вариации	0,075	0,090	0,244	0,142	0,144	0,437
<b><math>\lambda = 10,8</math> мкм</b>							
Морской	2	1,280	1,943	4,736	2,315	3,518	8,120
	5	0,853	1,352	3,564	1,593	2,570	7,068
	10	0,555	0,925	2,778	0,935	1,849	5,656
	23	0,001	0,400	1,937	0,001	0,912	3,881
	диапазон вариации	0,408	0,896	2,224	1,246	1,712	4,794
Континентальный	2	0,966	1,685	3,962	1,856	2,837	6,886
	5	0,714	0,982	2,986	1,114	1,971	5,856
	10	0,306	0,797	2,377	0,693	1,476	4,884
	23	0,001	0,046	1,604	0,001	0,545	3,084
	диапазон вариации	0,287	0,650	1,632	0,889	1,233	3,828
Городской	2	0,860	1,186	2,958	1,395	2,043	4,894
	5	0,530	0,877	2,349	0,838	1,576	4,389
	10	0,001	0,635	1,926	0,402	0,979	3,777
	23	0,001	0,001	0,990	0,001	0,133	2,454
	диапазон вариации	0,338	0,349	1,079	0,608	0,941	2,294

Анализ результатов моделирования позволяет отметить следующие моменты:

1. С повышением точности расчета радиационной температуры радиус бокового подсвета монотонно возрастает (рис. 1). При этом с изменением  $\delta T_\lambda$  в диапазоне  $1 - 0,5^\circ$  значение радиуса увеличивается не более чем на 2 км, в то время как в случае  $\delta T_\lambda \approx 0,5 - 0,1^\circ$  рост  $R$  в зависимости от  $\delta T_\lambda$  может превышать 5 км (таблица). Одновременно в интервале  $\delta T_\lambda \approx 0,5 - 0,1^\circ$  наблюдается и существенное увеличение диапазона изменчивости радиуса  $R$  за счет вариаций оптико-метеорологических параметров атмосферы.

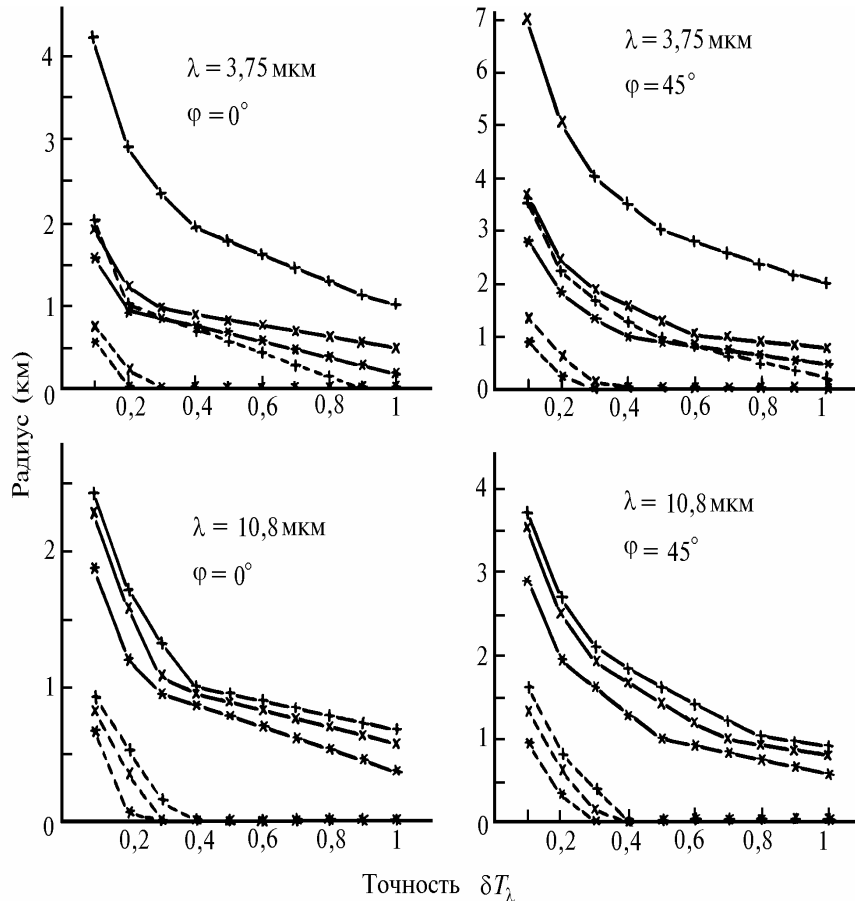


Рис. 1. Зависимость радиуса бокового подсвета от точности расчета радиационной температуры (лето средних широт): x – континентальный; + – морской; \* – городской тип аэрозоля;  $S_M$  – 2 км (сплошная) и 23 км (штриховая)

2. Для рассмотренных оптико-метеорологических ситуаций радиус бокового подсвета монотонно возрастает с увеличением оптической толщины аэрозольного рассеяния  $\tau_{sc}$  (рис. 2, а). Однако при низких значениях дальности видимости  $S_M < 10$  км рост радиуса существенно замедляется. Этот факт имеет следующее объяснение. Увеличение оптической толщины аэрозольного рассеяния приводит к росту интенсивности потока рассеянного теплового излучения [1] и к расширению пространственной области формирования эффекта бокового подсвета как за счет многократных, так и однократных столкновений. Однако начиная с определенных значений  $\tau_{sc}$  (например, морской аэрозоль,  $\lambda = 3,75$  мкм,  $S_M < 3 - 5$  км), в случае однократного рассеяния (доминирующего в структуре потока рассеянной радиации) дальнейший рост оптической толщины вызывает уменьшение  $J_{SURF}^{SS}$  и радиуса бокового подсвета (рис. 2, б). Одновременно увеличивается  $J_{ATM}^{MS}$  и возрастает относительный вклад атмосферы в поток рассеянного излучения. В результате происходит «насыщение» радиуса бокового подсвета.

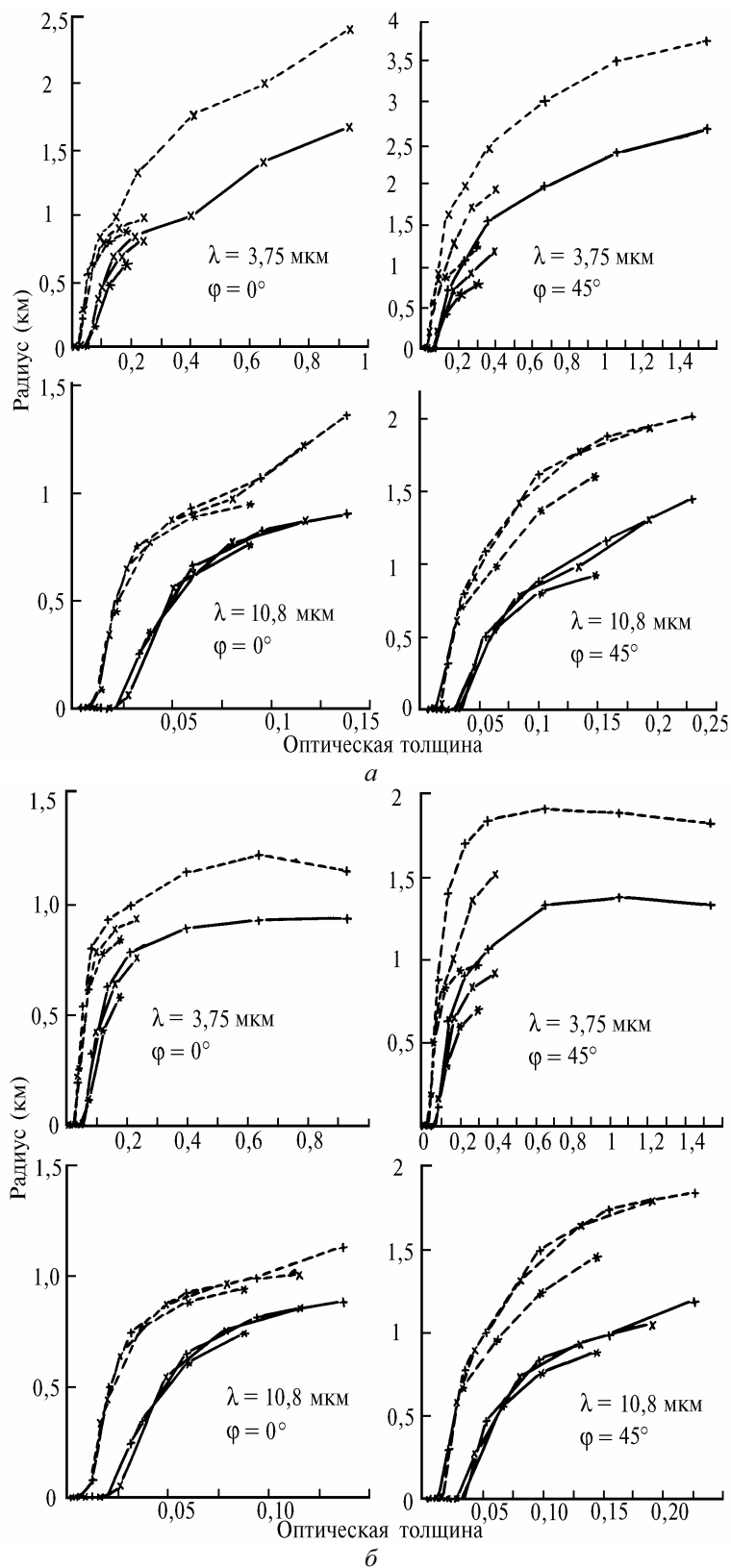


Рис. 2. Зависимость радиуса бокового подсвета от оптической толщины аэрозольного рас-сеяния (ле-то средних широт): x – континентальный; + – морской; \* – городской тип аэрозоля; а – случай много-кратного рассеяния; б – случай однократного рассеяния

3. Доминирующий вклад (свыше 60 %) в интенсивность бокового подсвета вносит участок поверхности, расположенный в радиусе  $R = 1$  км от точки зондирования. При этом вклад более далеких участков быстро убывает с ростом расстояния от точки зондирования  $r$ , что иллюстрируется зависимостью функции  $F(r)$  (рис. 3). Эта закономерность является характерной для всего рассмотренного диапазона оптико-геометрических условий наблюдения. Относительный вклад участка поверхности с радиусом 1 км, как правило, возрастает с ростом замутненности атмосферы (рис. 3). И только в условиях морского аэрозоля, для  $\lambda = 3,75$  мкм,  $S_M < 3 - 5$  км, величина  $F(r)|_{r=1}$  начинает убывать с уменьшением дальности видимости. Объяснение этого факта содержится в п. 2.

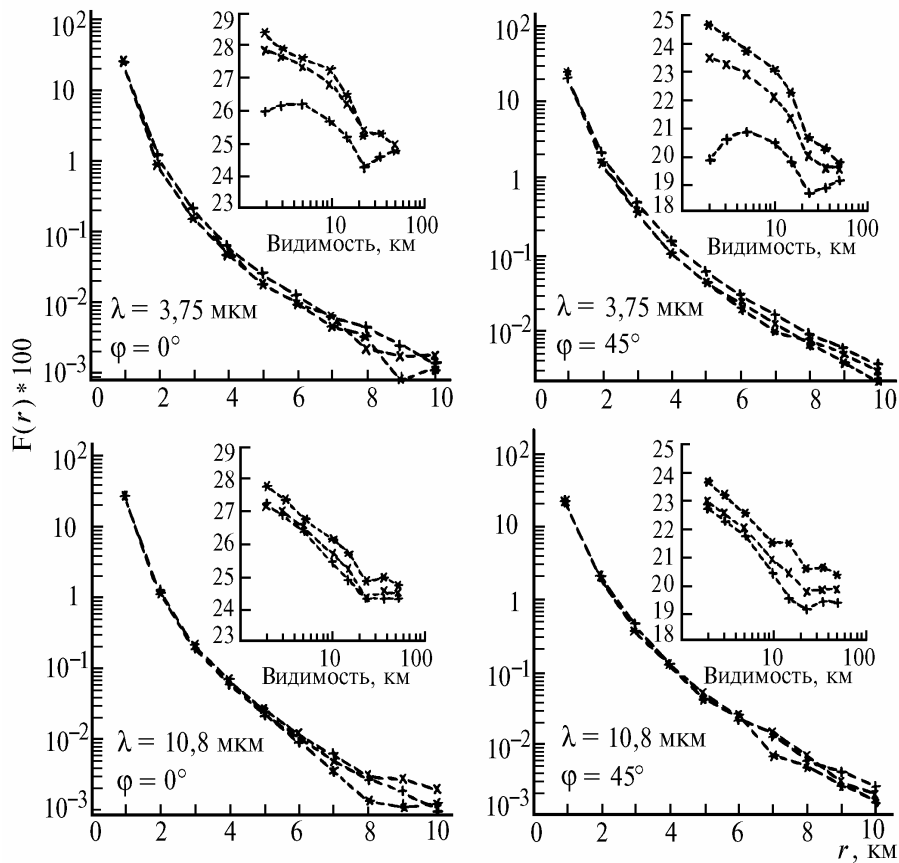


Рис. 3. Зависимость относительного вклада элементов поверхности  $F(r)$  в интенсивность бокового подсвета от расстояния до точки зондирования и зависимость  $F(r)|_{r=1}$  от дальности видимости (лето средних широт): x – континентальный; +- – морской; \* – городской тип аэрозоля

4. Качественный вид зависимости радиуса бокового подсвета от оптической толщины аэрозольного рассеяния, в том числе стремление  $R$  к «насыщению», является характерным для рассмотренных типов аэрозоля. Однако заметные расхождения при фиксированных значениях  $\tau_{SC}$  величины радиусов для различных типов аэрозоля позволяют предположить, что на  $R$  кроме  $\tau_{SC}$  оказывают влияние альbedo однократного рассеяния и индикатриса.

Практический интерес представляет сравнение радиуса бокового подсвета и пространственного разрешения (ПР) ряда современных приборов спутникового зондирования: поверхности океана – AVHRR ( $\lambda = 3,75$  и  $10,8$  мкм, разрешение  $\approx 1$  км) [3] и поверхности суши – NSCMR, MCSU – СК ( $\lambda \approx 11$  мкм, разрешение  $\approx 0,5$  км) [3,4].

Анализируя полученные данные с этой точки зрения, можно отметить следующее:

Для морского аэрозоля радиус подсвета  $R$  превышает ПР  $\approx 1$  км:

для уровня $\delta T_\lambda \approx 1^\circ$ –	при $S_M < 20 - 30$ км	( $\lambda = 3,75$ мкм)
	и $S_M < 11 - 17$ км	( $\lambda = 10,8$ мкм);
для уровня $\delta T_\lambda \approx 0,5^\circ$ –	при $S_M < 35 - 50$ км	( $\lambda = 3,75$ мкм)
	и $S_M < 21 - 31$ км	( $\lambda = 10,8$ мкм).

В случае континентального и городского аэрозоля радиус бокового подсвета  $R$  превышает ПР  $\approx 0,5$  км:

для уровня $\delta T_\lambda \approx 1^\circ$ –	при $S_M < 7 - 12$ км	( $\lambda = 3,75$ мкм)
	и $S_M < 11 - 16$ км	( $\lambda = 10,8$ мкм);
для уровня $\delta T_\lambda \approx 0,5^\circ$ –	при $S_M < 16 - 22$ км	( $\lambda = 3,75$ мкм).
	и $S_M < 20 - 28$ км	( $\lambda = 10,8$ мкм).

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Радиус эффективной области бокового подсвета не превышает 9 км для всех рассмотренных условий моделирования даже при высоких требованиях к точности  $\delta T_\lambda \approx 0,1^\circ$  расчета радиационной температуры собственного излучения системы (А–ПП).

2. При точности дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности порядка  $0,5 - 1^\circ$  эффективный размер области формирования бокового подсвета в большинстве оптико-метеорологических ситуаций заметно превосходит линейный размер мгновенного поля зрения современных приборов дистанционного ИК-зондирования подстилающей поверхности со средним и высоким (менее  $0,5-1$  км) пространственным разрешением. Этот факт необходимо учитывать при интерпретации результатов дистанционного зондирования в случае подстилающей поверхности, характеризующейся наличием значительных температурных неоднородностей вне поля зрения прибора.

1. Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1994. N 6. С. 797 – 809.
2. Otterman J., Fraser R. S. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 16. P. 2852 – 2860.
3. Philip N. Slater // Remote Sensing of Environment. 1985. N 17. P. 85–102.
4. Селиванов А.С., Тучин Ю.М. // Исследование Земли из космоса. 1988. N 3. С. 101–106.

Институт оптики атмосферы  
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
10 марта 1994 г.

S.V. Afonin, V.V. Belov, I.Yu. Makushkina. **Modeling of the Upgoing Flux of Thermal Radiation Scattered by Aerosol. Part 2. Radius of Lateral Illumination.**

In this paper we present investigation of statistical properties of the upgoing flux of thermal radiation scattered by aerosol of the system Atmosphere–Underlying Surface. A comparison of the radius of lateral illumination with the spatial resolution of modern spaceborne instrumentation for sounding the underlying surface in the IR region is presented.