

Особенности угловых характеристик диффузной солнечной радиации в малооблачной атмосфере

Т.Б. Журавлева, Т.В. Бедарева, Д.М. Кабанов,
И.М. Насртдинов, С.М. Сакерин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.02.2009 г.

Рассматривается изменение угловых характеристик диффузной солнечной радиации при появлении на ясном небе локальных неоднородностей в виде отдельного облака конечных размеров. На основе алгоритмов метода Монте-Карло получены количественные оценки этих изменений в альмукантарате Солнца в зависимости от длины волны, оптико-геометрических параметров облака и условий наблюдения. Представлены результаты сопоставлений данных численного моделирования и натурных измерений.

Ключевые слова: нисходящая солнечная радиация, спектрально-угловые характеристики, метод Монте-Карло, ясное небо, облака.

Введение

Для восстановления оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в настоящее время широко используются методы, основанные на наземных измерениях диффузной солнечной радиации в условиях безоблачного неба [1–5]. Это обстоятельство существенно ограничивает реализацию методов и требует применения процедур селекции экспериментальных данных — выделения и исключения результатов измерений, полученных в присутствии облаков.

Контроль за состоянием атмосферы может осуществляться на основе визуальных наблюдений [6, 7] или с привлечением дополнительного оборудования (например, лидара [8]). Однако в случае проведения массовых рутинных наблюдений это не всегда возможно, и более предпочтительными становятся автоматизированные процедуры исключения облачных ситуаций («cloud screening») [9, 10]. Например, в глобальной сети аэрозольного мониторинга AERONET процедура «cloud screening» удаляет из рассмотрения ситуации, когда облака расположены в направлении визирования «на Солнце» [9]. Поскольку при восстановлении микрофизических характеристик аэрозоля по данным измерений яркости неба в альмукантарате Солнца нужна более полная информация о состоянии небосвода, критерием выбора данных является выполнение условия симметрии яркости неба относительно солнечного вертикала,

характеризующего горизонтальную однородность атмосферы [1, 11].

К сожалению, используемые методы фильтрации не в полной мере обеспечивают обнаружение и исключение облачных ситуаций, что в конечном счете сказывается на качестве восстанавливаемых характеристик аэрозоля. Возможности совершенствования процедур «cloud screening», конечно, не исчерпаны: например, можно привести работу [12], где предложена методика селекции облачных искажений, основанная на анализе углового градиента диффузной радиации.

Не исключая необходимости дальнейшего развития методов облачной фильтрации, следует учитывать, что применение все более жестких критериев отбора данных ведет одновременно к сокращению числа наблюдательных ситуаций, пригодных для восстановления аэрозольных характеристик на основе измерений солнечными фотометрами. Особенно это важно при проведении мониторинга в умеренных широтах, где количество безоблачных ситуаций и так невелико.

В качестве примера рассмотрим статистику определения различных характеристик аэрозоля по результатам AERONET-наблюдений на территории Сибири. Объем полученных данных по каждой характеристике и районы мониторинга представлены в [13], а в табл. 1 приведены относительные величины, характеризующие эффективность восстановления аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания атмосферы ($N_{1,5}/N$), параметров микроструктуры (N_{vd}/N) и альbedo однократного рассеяния (АОР) аэрозоля (N_{ssa}/N).

В качестве исходной информации в расчетах использовались следующие данные: N — общая продолжительность (число дней) проведенных наблюдений;

* Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Татьяна Владимировна Бедарева; Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов; Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru).

$N_{1,5}$ — количество дней, в которые фактически были измерены АОТ и влагосодержание по уровню обработки 1,5 (подробнее см. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/publications.html); N_{vd} и N_{ssa} — количество дней измерений, в которые были восстановлены параметры микроструктуры и АОР аэрозоля соответственно.

Таблица 1
Относительная эффективность определения различных характеристик аэрозоля по результатам AERONET-наблюдений

Пункт наблюдения	$N_{1,5}/N, \%$	$N_{vd}/N, \%$	$N_{ssa}/N, \%$
г. Томск	59,2	17,1	2,2
п. Торы (Бурятия)	51,1	6,8	0,5
п. Горнотаежное (Уссурийск)	54,4	4,0	1,0
п. Октём (Якутск)	57,2	18,8	0,9
п. Коуровка (Екатеринбург)	50,3	9,4	1,3
п. Шихово (Звенигород)	54,5	16,4	2,6

Из данных табл. 1 следует, что приемлемая статистическая обеспеченность (50–60% наблюдательных ситуаций) реализуется для АОТ и влагосодержания атмосферы, которые восстанавливаются во всех случаях, когда Солнце не закрыто облаками. Все другие характеристики определяются только в условиях ясного неба — реально таких ситуаций менее 20% от общего числа дней наблюдений. Самая низкая эффективность имеет место при восстановлении АОР аэрозоля — в среднем около 1,5% ситуаций или несколько дней за год. Дело в том, что восстановление этой характеристики ограничено еще и возможностями алгоритма [1, 11], который дает надежную информацию только в условиях относительно высокого замутнения атмосферы (см. [14, рис. 2]).

Таким образом, не следует заблуждаться, что совершенствование алгоритмов облачной фильтрации позволит решить рассматриваемую проблему. При таком подходе мы получим более качественные, но малочисленные данные, которые характерны лишь для единичных ситуаций и не могут быть репрезентативными для исследуемого района. На наш взгляд, более актуальными задачами являются расширение границ применения существующих методов восстановления микрофизических/оптических характеристик аэрозоля или развитие новых подходов. Опыт наших исследований дает основание предположить, что использование некоторых известных методов можно распространить на малооблачные ситуации. Первым этапом решения этой задачи является исследование трансформации полей яркости неба при появлении в атмосфере локальных неоднородностей в виде облачных образований. В настоящей статье обсуждаются результаты численного моделирования спектрально-угловых характеристик диффузного излучения в альмукантарате Солнца в присутствии отдельного (изолированного) облака и приводятся результаты сравнений с экспериментальными данными.

1. Модель атмосферы и методы расчета

Численное моделирование нисходящей диффузной радиации выполнено для четырех спектральных каналов солнечного фотометра CE-318: 0,44; 0,67; 0,87 и 1,02 мкм, в пределах которых можно пренебречь молекулярным поглощением [15]. Солнечный фотометр CE-318 измеряет рассеянное излучение в альмукантарате Солнца в диапазоне оптических масс $t \leq 4$, что позволяет не учитывать в расчетах эффекты сферичности атмосферы [16]. В связи с этими обстоятельствами мы использовали в своих исследованиях описанную ниже плоскопараллельную модель атмосферы.

1.1. Модель атмосферы

Введем декартову систему координат OXYZ таким образом, чтобы ось OZ была расположена перпендикулярно поверхности Земли. Предположим, что на верхнюю границу атмосферы $z = H$ в направлении ω_0 падает монохроматический поток солнечного излучения (рис. 1).

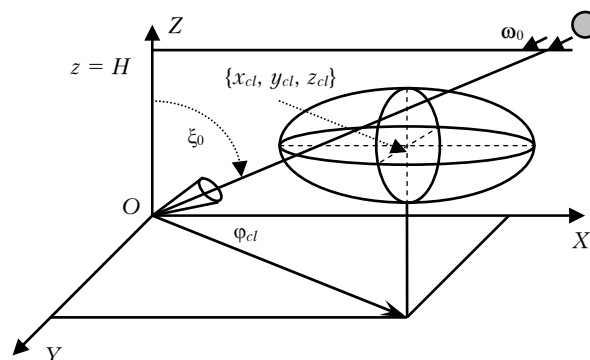


Рис. 1. Геометрическая схема наблюдений яркости в солнечном альмукантарате (облако аппроксимировано эллипсоидом)

Направление «на Солнце» $(-\omega_0) = (\xi_0, \varphi_0 = 0)$, противоположное направлению падения излучения ω_0 , характеризуется зенитным углом ξ_0 между осью OZ и вектором $-\omega_0$ и углом $\varphi_0 = 0$ относительно оси OX.

Для расчета полей яркости неба в молекулярно-аэрозольной атмосфере необходимо задать пространственное распределение коэффициентов рэлеевского рассеяния $\sigma_R(\mathbf{r})$ и аэрозольного ослабления $\sigma_a(\mathbf{r})$, АОР аэрозоля $\Lambda_a(\mathbf{r})$, а также индикатрис аэрозольного $g_a(\mathbf{r}, \mu)$ и рэлеевского $g_R(\mu)$ рассеяния излучения, μ — косинус угла рассеяния. Будем считать, что вертикально-неоднородная модель атмосферы имеет кусочно-постоянную структуру, т.е. разбивается на слои, в пределах каждого из которых все оптические характеристики постоянны.

Отдельное облако обычно аппроксимируется простейшими геометрическими фигурами: эллипсоидом, опрокинутым усеченным параболоидом, параллеле-

пипедом и т.д. В данном эксперименте облако задавалось в виде эллипсоида

$$\frac{(x - x_{cl})^2}{R_x^2} + \frac{(y - y_{cl})^2}{R_y^2} + \frac{(z - z_{cl})^2}{R_z^2} = 1,$$

где (x_{cl}, y_{cl}, z_{cl}) – координаты центра; R_x, R_y, R_z – размеры полуосей (см. рис. 1).

Положение центра облака в пространстве будем характеризовать зенитным ξ_{cl} и азимутальным φ_{cl} углами (φ_{cl} отсчитывается от оси OX против часовой стрелки) и расстоянием между центром облака и приемником, расположенным в начале координат R_{cl} :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{cl} &= y_{cl}/x_{cl}, \quad \operatorname{tg} \xi_{cl} = z_{cl}/\sqrt{x_{cl}^2 + y_{cl}^2}, \\ R_{cl}^2 &= x_{cl}^2 + y_{cl}^2 + z_{cl}^2. \end{aligned}$$

В пределах облака его оптические характеристики ($\sigma_{cl}, \Lambda_{cl}$ и $g_{cl}(\mu)$) считались постоянными. В областях пространства, содержащих локальные облачные образования, оптические характеристики среды представлялись в виде

$$\begin{aligned} \sigma(\mathbf{r}) &= \sigma_{cl}(\mathbf{r}) + \sigma_a(\mathbf{r}) + \sigma_R(\mathbf{r}); \\ \Lambda(\mathbf{r}) &= \frac{\sigma_{cl}(\mathbf{r})\Lambda_{cl}(\mathbf{r}) + \sigma_a(\mathbf{r})\Lambda_a(\mathbf{r}) + \sigma_R(\mathbf{r})}{\sigma_{cl}(\mathbf{r}) + \sigma_a(\mathbf{r}) + \sigma_R(\mathbf{r})}; \\ g(\mathbf{r}, \mu) &= \\ &= \frac{[\sigma_{cl}(\mathbf{r})\Lambda_{cl}(\mathbf{r})g_{cl}(\mathbf{r}, \mu) + \sigma_a(\mathbf{r})\Lambda_a(\mathbf{r})g_a(\mathbf{r}, \mu) + \sigma_R(\mathbf{r})g_R(\mathbf{r}, \mu)]}{\sigma_{cl}(\mathbf{r})\Lambda_{cl}(\mathbf{r}) + \sigma_a(\mathbf{r})\Lambda_a(\mathbf{r}) + \sigma_R(\mathbf{r})}. \end{aligned}$$

Вне облака и для условий безоблачной атмосферы оптические характеристики определялись аналогичными соотношениями (без облачной составляющей).

Предполагалось, что падающее излучение отражается от подстилающей поверхности (ПП) $z = 0$ согласно закону Ламберта с альбедо A_s .

1.2. Методы расчета

Моделирование полей яркости выполнено на основе алгоритмов метода сопряженных блужданий [16], особенности реализации которых в плоскопараллельной горизонтально-однородной и неоднородной атмосферах описаны в [17, 18].

Для расчета угловых характеристик в неоднородной атмосфере (при наличии облака) нами реализовано 2 алгоритма, отличающихся способами моделирования длины свободного пробега l : в алгоритме 1 моделирование l выполняется на основе канонических процедур, использующихся для аналогового моделирования траекторий фотонов, а в алгоритме 2 для этой цели используется метод максимального сечения [19]. Сравнение показало, что различие результатов моделирования находится в пределах относительной погрешности расчетов, не превосходящей в большинстве случаев 0,5–1%. Представленные ниже результаты получены на основе алгоритма 1, поскольку он является менее трудоемким. Отметим также, что вычисление яркости в при-

сутствии облака выполнялось – в отличие от горизонтально-однородной атмосферы – для каждого азимутального угла отдельно ввиду того, что условие симметрии атмосферы нарушено.

1.3. Входные параметры

При задании характеристик аэрозоля использовался комбинированный подход, сочетающий результаты реальных измерений и модельные представления. Спектральные АОТ атмосферы τ_λ в интервале 0,37–4,0 мкм основывались на многолетних наблюдениях солнечными фотометрами в районе Томска (Академгородок) в летние периоды 2001–2005 гг. [20]. Среднее, среднеквадратическое отклонение и модальное значения при $\lambda = 0,5$ мкм для этого периода составили 0,16; 0,085 и 0,12 соответственно. Сведения об АОР и индикатрисе рассеяния аэрозоля были взяты из модели континентального аэрозоля Cont-I WCP [21]. Следует отметить хорошее согласие спектральной зависимости АОТ, полученной для района Томска в интервале 0,37–1,5 мкм, с данными модели Cont-I (см. [14, рис. 1]). Спектральная зависимость и вертикальный профиль коэффициента рэлеевского рассеяния соответствовали [22].

Оптические характеристики облаков задавались на основе модели WCP [21], в которой распределение частиц по размерам аппроксимируется Г-распределением [23]:

$$f(r) = N_{cl} a r^\alpha \exp(-r/\beta),$$

где N_{cl} – концентрация частиц ($1/\text{см}^3$); a – нормировочная константа; $\alpha = 2$; $\beta = 1,5 \text{ км}^{-1}$ (эффективный радиус капель $r_{ef} = 7,5 \text{ мкм}$). Отметим, что в отличие от аэрозоля оптические характеристики облаков в диапазоне 0,44–1,02 мкм слабо зависят от длины волны: в частности, спектральная изменчивость σ_{cl} не превосходит 3%.

Для описания спектральной зависимости альбедо ПП $A_s(\lambda)$ используются модельные данные [24, 25]. Значения альбедо для некоторых типов ПП в спектральных каналах SE-318 представлены в табл. 2.

Отметим особенность растительных зеленых покровов, которая состоит в том, что значения $A_s(\lambda)$ в диапазоне спектра $0,7 \leq \lambda \leq 1,2$ мкм почти на порядок больше, чем в видимой области. Приведенные в настоящей статье результаты моделирования выполнены в основном для $A_s(\lambda)$ типа «мозаика» (50% трава + 50% сухое шоссе), которое можно считать близким к альбедо ПП в пригороде Томска (Академгородок).

При сканировании облака в альмукантарате Солнца ось приемника $\{\omega_0 = (\xi_0, \varphi)\}$, где угол φ отсчитывается против часовой стрелки от направления «на Солнце», вырезает в пределах облачного элемента участок поверхности Surf_{cl} . В большинстве представленных расчетов (если это не оговаривалось особо) предполагалось, что Surf_{cl} проходила через центр облака (x_{cl}, y_{cl}, z_{cl}) : $\xi_0 = \xi_{cl} = 60^\circ$, $\varphi_{cl} = 30^\circ$; оптические и геометрические характеристики облака полагались равными $R_x = R_y = 0,3 \text{ км}$, $R_z = 0,5 \text{ км}$,

Таблица 2

Альbedo подстилающей поверхности для различных типов поверхности: трава, хвойный и лиственный лес, песок [24], сухое шоссе [25]

λ , мкм	Тип подстилающей поверхности					
	Трава	Хвойный лес	Лиственный лес	Шоссе сухое	Мозаика (50% трава, 50% шоссе)	Песок
0,44	0,041	0,048	0,058	0,156	0,098	0,052
0,55	0,11	0,105	0,109	0,195	0,153	0,14
0,67	0,045	0,041	0,048	0,221	0,133	0,215
0,87	0,502	0,517	0,553	0,254	0,378	0,28
1,02	0,509	0,5	0,548	$A_s(\lambda = 0,87 \text{ мкм})$	0,382	0,32

$z_{cl} = 2,5 \text{ км}$; $\sigma_{cl} = 5 \text{ км}^{-1}$ (диапазон изменения $1 \leq \sigma_{cl} \leq 20 \text{ км}^{-1}$). Для перехода к абсолютным значениям яркости результаты моделирования умножались на внеатмосферную спектральную солнечную постоянную $S_{\Delta\lambda}$, которая составляла 185, 151, 97 и 71 мкВт/(см² · нм · ср) в перечисленных выше каналах фотометра SE-318 соответственно (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

2. Спектрально-угловые характеристики яркости в альмукантарате Солнца

Рассмотрим, насколько различаются угловые характеристики диффузной радиации в условиях ясного неба $B_{clr}(\lambda, \varphi)$ и при наличии отдельного облака $B_{cld}(\lambda, \varphi)$. Очевидно, что наибольшие изменения яркости следует ожидать в области азимутальных углов визирования φ , непосредственно проходящих через облачный элемент и околооблачное пространство. В этом диапазоне углов наблюдаемая яркость формируется в основном за счет рассеяния и ослабления в пределах облака, оптические характеристики которого существенно отличаются от оптических характеристик окружающей среды.

2.1. Поля яркости нисходящей диффузной радиации

Для оценки изменения спектрально-угловых распределений рассеянной радиации будем использовать величины

$$K(\lambda, \varphi) = B_{cld}(\lambda, \varphi) / B_{clr}(\lambda, \varphi)$$

$$\text{и } \delta B(\lambda, \varphi) = 100\% \times [K(\lambda, \varphi) - 1],$$

которые характеризуют относительное различие между $B_{cld}(\lambda, \varphi)$ и $B_{clr}(\lambda, \varphi)$.

На рис. 2, а представлены результаты численного моделирования спектральной яркости в условиях ясного неба и в присутствии отдельного облака. Из этих данных (см. также кривую 1 на рис. 2, б) следует, что изменение яркости при появлении облака можно считать существенным в трех диапазонах азимутальных углов наблюдения: в геометрической зоне расположения облака ($\varphi = 26\text{--}34^\circ$), в небольшой области «до облака» — со стороны Солнца

($\varphi \sim 24\text{--}26^\circ$) и в более протяженной области «за облаком» ($\varphi \sim 34\text{--}60^\circ$). Причины и особенности формирования яркости в этих участках будут рассмотрены отдельно в подразделе 2.2.

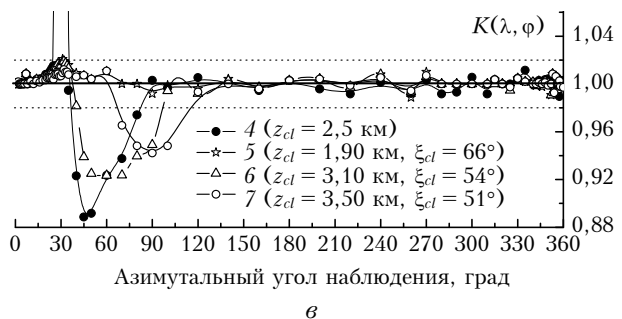
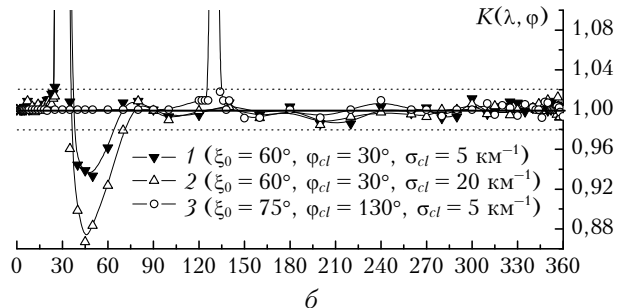
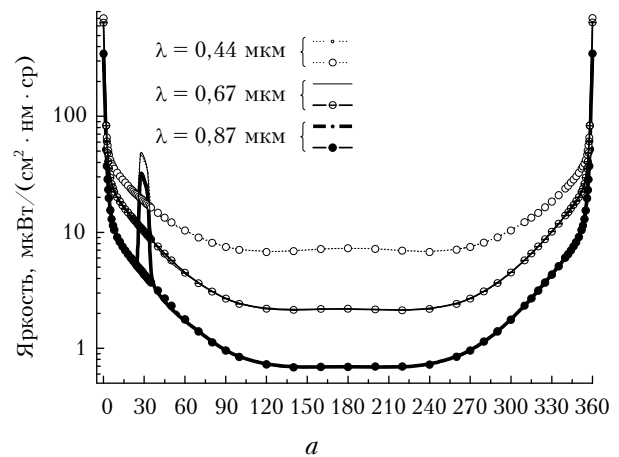


Рис. 2. Азимутальный ход яркости неба в альмукантарате Солнца при наличии облака (линии) и в его отсутствие (символы) (а) и относительного изменения яркости $K(\lambda = 0,87 \text{ мкм}, \varphi)$ в различных условиях наблюдений (б, в)

Вне указанных зон $K(\lambda, \varphi)$ изменяется в небольшом диапазоне $0,985 \leq K(\lambda, \varphi) \leq 1,015$, что соответствует относительному различию между $B_{clд}(\lambda, \varphi)$ и $B_{clр}(\lambda, \varphi)$ в пределах 1,5%. Такое же малое различие яркостей сохраняется при изменении коэффициента ослабления σ_{cl} , азимута φ_{cl} и зенитного угла наблюдения $\xi_0 = \xi_{cl}$ (см. кривые 2 и 3 на рис. 2).

При удалении центра облака от направления солнечного альмукантарата его влияние на диффузную радиацию уменьшается. До тех пор пока облако находится в поле зрения приемника (ξ_0 не обязательно совпадает с ξ_{cl}), различия между $B_{clд}(\lambda, \varphi)$ и $B_{clр}(\lambda, \varphi)$ сохраняются как в пределах зоны расположения облака, так и в околооблачном пространстве (кривая 4). При дальнейшем изменении z_{cl} облако может выйти за пределы поля зрения приемника. В таких условиях наблюдения значение $K(\lambda, \varphi)$ в зоне $\varphi = 26 \div 34^\circ$ существенно не возрастет ($K(\lambda, \varphi) \leq 1,02$), а изменение диффузной радиации в зоне «за облаком» будет зависеть от того, находится облако ниже или выше направления визирования. Если $\xi_{cl} > \xi_0$ (облако «ниже» солнечного альмукантарата, кривая 5), то облако при указанных параметрах мало влияет на поле яркости: для всех азимутальных углов наблюдения $0,985 \leq K(\lambda, \varphi) \leq 1,015$. Если облако целиком расположено выше солнечного альмукантарата, то зависящее от высоты облака z_{cl} относительное различие $\delta B(\lambda, \varphi) \geq 1,5-2\%$ наблюдается в теневой зоне за облаком (кривые 6 и 7, см. также подраздел 2.2).

Факт малого отличия яркости $B_{clд}(\lambda, \varphi)$ от $B_{clр}(\lambda, \varphi)$ в большей части азимутальных углов наблюдения имеет важное значение, поскольку определяет потенциальную возможность реализации некоторых методов восстановления оптических/микрофизических характеристик аэрозоля в малооблачных ситуациях.

2.2. Особенности формирования яркости в облаке и околооблачном пространстве

Азимутальная зависимость $B_{clд}(\lambda, \varphi)$ в геометрической зоне расположения облака определяется условиями наблюдения и его оптико-геометрическими характеристиками, в том числе длиной отрезка оси приемника $l_{cl}(\varphi)$ в пределах облака.

При фиксированных параметрах облака изменение яркости происходит в основном под влиянием двух факторов. С одной стороны, возрастание $l_{cl}(\varphi)$ означает рост числа рассеивателей и, следовательно, обуславливает увеличение яркости. С другой стороны, как прямая, так и рассеянная радиация, достигающая элементарного объема на линии визирования, ослабляется тем больше, чем больше длина оптического пути, вдоль которого распространялось излучение. Конкуренция этих двух противоположных факторов в пределах облака может быть причиной отклонения от монотонной зависимости $B_{clд}(\lambda, \varphi)$.

Отметим, что в ряде случаев значительный вклад в яркость может внести также компонента однократного рассеяния, определяемая, в частности, значением индикатрисы $g_{cl}(\mu)$ на соответствующих углах рассеяния. Например, «индикатрисный» эффект может проявиться при невысоких значениях коэффициента ослабления σ_{cl} или в зоне углов визирования, которые близки к границе облака, освещаемой Солнцем.

Рассмотрим ситуацию, когда облако с указанными выше параметрами находится в поле зрения приемника в области азимутальных углов наблюдения $\varphi \sim 26 \div 34^\circ$ (рис. 3). В этом случае с увеличением φ (удаление от Солнца) ослабление излучения, достигающее линии визирования, возрастает, тогда как $l_{cl}(\varphi)$ сначала увеличивается, а затем уменьшается. Под влиянием этих двух эффектов диффузная радиация увеличивается в пределах углов $\varphi \sim 27 \div 28^\circ$, а затем начинает падать (рис. 3, а).

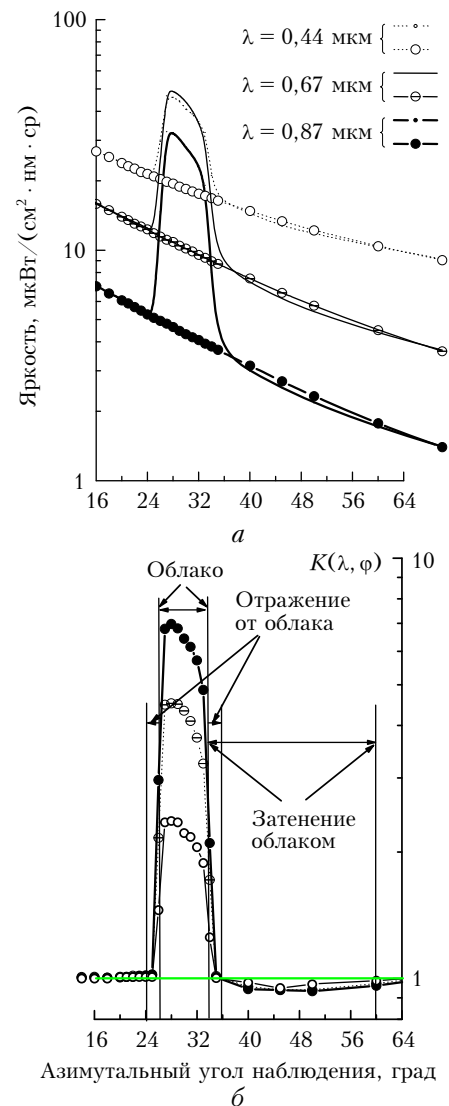


Рис. 3. Зависимость азимутальной яркости неба при наличии облака (линии) и в его отсутствие (символы) (а) и $K(\lambda, \varphi)$ в геометрической зоне нахождения облака и околооблачном пространстве (б)

Изменение яркости *вблизи облака* в реальной атмосфере может происходить, как минимум, по двум причинам. Во-первых, в околооблачном пространстве микрофизические характеристики среды имеют некоторые специфические особенности, обусловленные отсутствием четкой границы облака. Во-вторых, вблизи облака наиболее сильно проявляются особенности радиационного воздействия, выражающиеся как в увеличении освещенности околооблачного пространства за счет отражения солнечной радиации от облака, так и в ее уменьшении за счет эффекта затенения (если таковое имеется). В используемой нами модели атмосферы микрофизические особенности среды вблизи облака не учитываются. Поэтому все рассматриваемые здесь эффекты являются следствием радиационного воздействия (см., например, [26, 27]).

В подразделе 2.1 было показано, что вне зоны облачного влияния различие яркостей $B_{cl_d}(\lambda, \varphi)$ и $B_{cl_r}(\lambda, \varphi)$ не превышает 1,5–2%, поэтому значение $|\delta B(\lambda, \varphi)| \approx 1,5 \div 2\%$ выбрано нами в качестве критерия при описании границ околооблачного пространства, где проявляется упомянутое выше радиационное влияние облака (рис. 3, б).

Характер изменения яркости в областях «до облака» и «за облаком» имеет отличия, поскольку формируется под разным влиянием двух эффектов. Первый эффект проявляется в увеличении яркости $B_{cl_d}(\lambda, \varphi)$ вблизи облака ($\varphi \sim 24 \div 26^\circ$ и $\varphi \sim 34 \div 36^\circ$) из-за дополнительной подсветки радиацией, отраженной от облака (апертура приемника $0,6^\circ$). Однако пространство «за облаком» ($\varphi > 34^\circ$) затенено, вследствие чего достигающая эту область солнечная радиация ослабляется в большей степени, чем в отсутствие облачности. Результат совместного влияния этих конкурирующих факторов определяет изменение $B_{cl_d}(\lambda, \varphi)$: в диапазоне углов $\varphi \sim 34 \div 36^\circ$ доминирует влияние дополнительной освещенности ($K(\lambda, \varphi) > 1$), а затем ($\varphi \sim 36 \div 60^\circ$) начинает преобладать эффект затенения и $K(\lambda, \varphi)$ становится меньше единицы.

Положение и размеры зоны затенения при различных зенитных углах Солнца характеризуются азимутальными углами φ , определяемыми пересечением линий визирования за пределами облака и цилиндра, основанием которого является проекция части облака, расположенной выше плоскости сканирования $Surf_{cl}$ на плоскость XOZ , а образующие параллельны направлению солнечных лучей. При смещении центра облака выше солнечного альмукантара ($\xi_{cl} < \xi_0$) часть облака над $Surf_{cl}$ по сравнению со случаем $\xi_{cl} = \xi_0$ увеличивается и зона затенения расширяется (см. кривые 1 и 4, рис. 2). Когда облако целиком находится выше направления визирования, то с увеличением высоты z_{cl} зона затенения смещается в область больших азимутальных углов и различия между $B_{cl_d}(\lambda, \varphi)$ и $B_{cl_r}(\lambda, \varphi)$ сокращаются (см. кривые 6 и 7). При возрастании коэффициента ослабления влияние затенения усиливается и $K(\lambda, \varphi)$ уменьшается (кривые 1 и 2).

Относительно спектральных особенностей облачного влияния отметим следующее. Поскольку оптические характеристики облаков в интервале $0,44 \div 1,02$ мкм практически постоянны, а коэффициенты аэрозольного ослабления и рэлеевского рассеяния имеют степенной спад с ростом λ , то значение $K(\lambda, \varphi)$ существенно увеличивается с возрастанием длины волны (см. рис. 3). Например, на длине волны $0,44$ мкм $K(\lambda, \varphi)$ в пределах облака составляет $1,5 \div 2$, а в области $0,87$ мкм возрастает до $5 \div 7$.

Представленные результаты получены при задании облака в виде эллипсоида. Очевидно, что в общем случае изменение угловых характеристик диффузной радиации при появлении облачности будет определяться не только рассмотренными выше эффектами подсветки и затенения, но также формой и размерами облаков.

2.3. Зависимость угловых характеристик диффузной радиации от параметров облака и его положения в пространстве

Для сравнения изменений яркости неба в различных условиях помимо $K(\lambda, \varphi)$ введем две дополнительные характеристики. Одна из них будет характеризовать диапазон азимутальных углов наблюдения $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$, для которых выполняется соотношение $K(\lambda, \varphi) \geq 1,02$. Согласно полученным выше результатам этому условию удовлетворяют значения φ в зоне шириной $\Delta_\varphi(\lambda) = \varphi_2 - \varphi_1$ в пределах облака и области радиационного воздействия, где доминирующим является эффект отражения радиации от облака. Вторая характеристика вводится для описания относительной величины всплеска яркости («амплитуды»), которую определим как $A(\lambda) = K(\lambda, (\varphi_1 + \varphi_2)/2)$.

Рассмотрим, как зависят значения $\Delta_\varphi(\lambda)$ и $A(\lambda)$ от оптико-геометрических параметров облака и его положения в пространстве (рис. 4).

В качестве базового варианта используем характеристики диффузной радиации в следующих условиях:

$$\lambda = 0,87 \text{ мкм}; \varphi_{cl} = 30^\circ, \xi_{cl} = \xi_0 = 60^\circ;$$

$$z_{cl} = 2,5 \text{ км}, \sigma_{cl} = 5 \text{ км}^{-1};$$

ширина зоны радиационного воздействия

$$\Delta_\varphi(\lambda = 0,87 \text{ мкм}) = \varphi_2 - \varphi_1 = 12^\circ;$$

$$(\varphi_1 = 24^\circ \leq \varphi \leq \varphi_2 = 36^\circ);$$

$$A(\lambda = 0,87 \text{ мкм}) \sim 6,4 \text{ (кривая 2)}.$$

Следствием спектральной изменчивости $K(\lambda, \varphi)$ является зависимость всплеска яркости в облаках от длины волны: с уменьшением длины волны от $0,87$ до $0,44$ мкм $A(\lambda)$ падает до $\sim 2,2$ по сравнению с базовым вариантом (кривые 1 и 2), а при удалении центра облака от направления «на Солнце» ($\varphi_{cl} = 130^\circ$) $A(\lambda)$ уменьшается от $\sim 5,0$ до $\sim 1,3$ (кривые 4 и 5, рис. 4). При увеличении зенитного

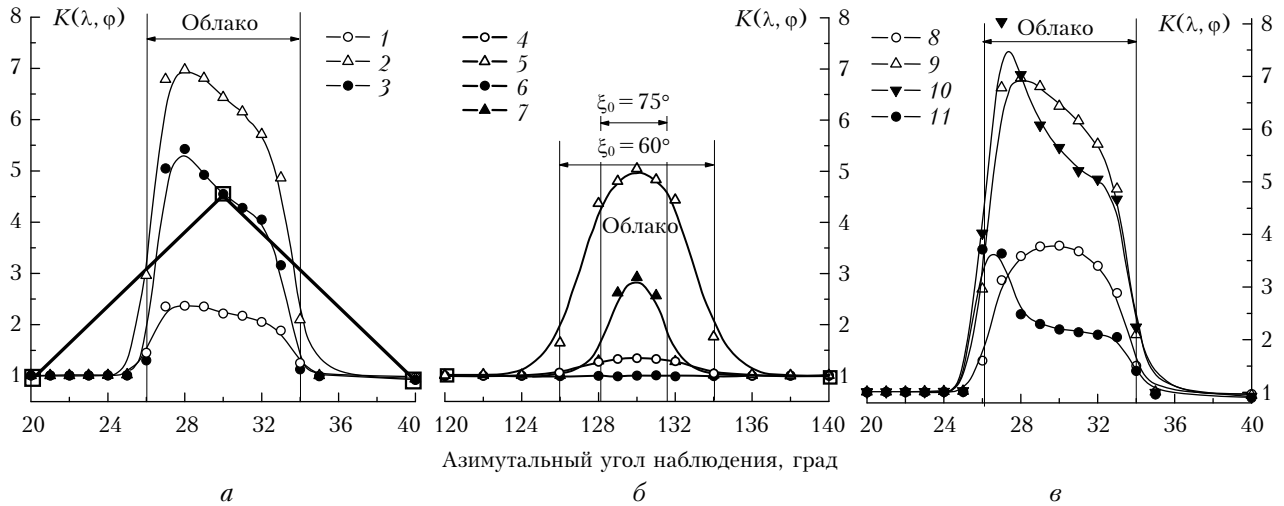


Рис. 4. Азимутальная изменчивость $K(\lambda, \varphi)$ в зависимости от характеристик облака: *a* – кривая 1 – $\lambda = 0,44$ мкм; 2 – $\lambda = 0,87$ мкм; 3 – $\lambda = 0,87$ мкм, $z_{cl} = 2,75$ км; *б* – $\varphi_{cl} = 130^\circ$, кривая 4 – $\lambda = 0,44$ мкм, $\xi_0 = 60^\circ$; 5 – $\lambda = 0,87$ мкм, $\xi_0 = 60^\circ$; 6 – $\lambda = 0,44$ мкм, $\xi_0 = 75^\circ$; 7 – $\lambda = 0,87$ мкм, $\xi_0 = 75^\circ$; *в* – $\lambda = 0,87$ мкм, кривая 8 – $\sigma_{cl} = 1$ км $^{-1}$; 9 – $\sigma_{cl} = 5$ км $^{-1}$; 10 – $\sigma_{cl} = 10$ км $^{-1}$; 11 – $\sigma_{cl} = 20$ км $^{-1}$

угла Солнца ξ_0 от 60 до 75° различие между $B_{cl,d}(\lambda, \varphi)$ и $B_{cl,r}(\lambda, \varphi)$ уменьшается: для $\lambda = 0,87$ мкм величина всплеска падает примерно в 2 раза (кривые 5 и 7), а при $\lambda = 0,44$ мкм и $\xi_0 = 75^\circ$ изменение яркости не выходит за пределы относительной погрешности расчетов [$A(\lambda = 0,44$ мкм) ~ 1 , кривая 6].

По мере удаления облака от альмукуантарата Солнца зона радиационного воздействия сужается (кривые 2 и 3, рис. 4). При возрастании расстояния между приемником и центром облака R_{cl} и неизменной высоте z_{cl} (что соответствует увеличению $\xi_{cl} = \xi_0$) угловой размер облака и соответственно Δ_φ уменьшаются: например, для $\lambda = 0,87$ мкм Δ_φ сужается от $\sim 15^\circ$ до $\sim 8^\circ$ (кривые 5 и 7). Очевидно, что такое уменьшение углового диапазона будет наблюдаться и в том случае, когда облако будет удаляться от приемника при неизменном значении ξ_0 .

Поскольку интенсивность нисходящей диффузной радиации является немонотонной функцией оптической толщи атмосферы, следует ожидать немонотонной зависимости $A(\lambda)$ от коэффициента ослабления облаков. Влияние изменения коэффициента ослабления облака может сказаться и на Δ_φ – преимущественно за счет теневой области «за облаком», поскольку возрастание σ_{cl} приводит к существенному усилению эффекта затенения и, следовательно, к перераспределению факторов, определяющих радиационное воздействие облака. Сделанные предположения подтверждаются рис. 4, в. Отметим также, что влияние σ_{cl} на величину всплеска яркости может быть очень сильным: например, увеличение σ_{cl} от 10 до 20 км $^{-1}$ сопровождается уменьшением $A(\lambda = 0,87$ мкм) почти в 3 раза (см. рис. 4, в).

Таким образом, расчеты показывают, что амплитуда всплеска яркости при визировании облака и ширина зоны радиационного воздействия на заданной длине волны не являются однозначной функцией оптико-геометрических параметров облака. Это обу-

словлено, в частности, тем, что даже в предположениях о заданной геометрической форме облака и постоянстве коэффициента ослабления значение $A(\lambda)$ не является монотонной функцией σ_{cl} и зависит от поверхности, образованной осью приемника в пределах облака. Необходимо иметь в виду также, что форма реальных облаков много сложнее простых геометрических форм, которые обычно используются для их аппроксимации, а коэффициент ослабления облаков не является постоянным.

3. Сравнение результатов численного моделирования и измерений полей яркости

Для подтверждения результатов численного моделирования представляло интерес получить аналогичные оценки влияния облачности в реальных условиях наблюдений. Ниже представлены первые результаты в этом направлении.

Напомним, что установленный в г. Томске автоматизированный Sun-Sky фотометр SE-318 имеет программно-заданный режим измерений прямой и диффузной радиации. В частности, измерение яркости неба на альмукуантарате Солнца большую часть дня проводится с периодичностью 1 раз в час и только для 30 азимутов φ с переменным шагом $\Delta\varphi$: 0,5–1° – в области ореола ($\varphi \leq 10^\circ$), 20° – в задней полусфере ($\varphi \geq 100^\circ$) и 2–10° – в промежуточной области углов (подробнее см. [17]).

При таком режиме работы затруднены как исследование угловых характеристик радиационного поля в присутствии отдельных облаков, так и обнаружение самого факта наличия облачности. Поэтому для экспериментальных исследований яркости неба в условиях облачности был привлечен сканирующий трехканальный фотометр собственной разработки,

позволяющий проводить непрерывные (по углу) измерения диффузной радиации. Основные характеристики фотометра: спектральные каналы (интерференционные фильтры) – 0,50; 0,67; 0,87 мкм; полуширина фильтров 0,01 мкм; мгновенный угол поля зрения ~ 2°; шаг отметчика угла поворота фотометра по азимуту ~ 0,5°.

С использованием указанного фотометра летом 2008 г. на полигоне ИОА СО РАН «Фоновый» (в 60 км от Томска) были проведены контролируемые измерения яркости неба в малооблачных ситуациях. На рис. 5, а приведен пример угловых зависимостей спектральной яркости неба на альмукуктарате Солнца при следующих условиях наблюдений: зенитный угол Солнца $\xi_0 = 36^\circ$, $\tau_a^{0,5} = 0,12$, облачность – около 2 баллов (перистые облака – вблизи

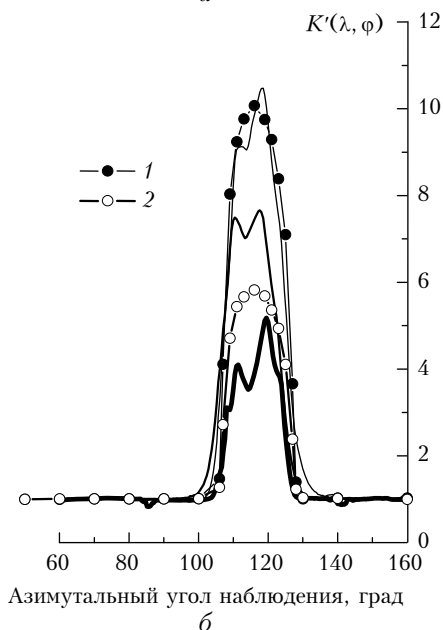
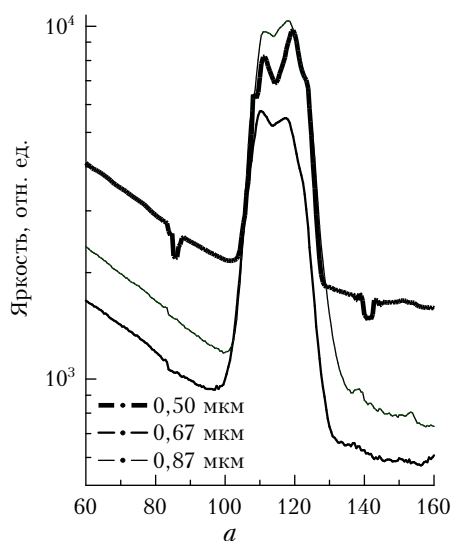


Рис. 5. Азимутальная зависимость яркости неба в альмукуктарате Солнца (а) и $K'(\lambda, \varphi)$ (б). Кривые 1 и 2 соответствуют расчетам $K(\lambda = 0,87 \text{ мкм}, \varphi)$ и $K(\lambda = 0,44 \text{ мкм}, \varphi)$ при $\xi_0 = 36^\circ$, $\sigma_{cl} = 4 \text{ км}^{-1}$, $z_{cl} = 3,24 \text{ км}$, $\varphi_{cl} = 117^\circ$, $R_x = R_y = 0,43 \text{ км}$, $R_z = 0,4 \text{ км}$

направления на Солнце и кучевые облака – в области азимутального угла $\varphi = 115\div 120^\circ$).

Для оценки относительного изменения яркости в зоне облака введем характеристику, аналогичную используемой при численном моделировании (см. подраздел 2.1):

$$K'(\lambda, \varphi) = B_{cl}^{\text{exp}}(\lambda, \varphi) / B'(\lambda, \varphi),$$

где $B_{cl}^{\text{exp}}(\lambda, \varphi)$ – измеренная яркость, а $B'(\lambda, \varphi)$ получена в результате удаления из $B_{cl}^{\text{exp}}(\lambda, \varphi)$ данных в области ~ 95–135° (область радиационного воздействия облака) и последующей интерполяции. Величина $K'(\lambda, \varphi)$ позволяет оценить зону и амплитуду радиационного воздействия облака на яркость неба в разных спектральных участках.

Как следует из рис. 5, имеют место тенденции увеличения зоны радиационного воздействия $\Delta_\varphi(\lambda)$ и возрастание амплитуды всплеска яркости при увеличении длины волны от 0,5 до 0,87 мкм. Полученные оценки и относительное увеличение яркости с ростом длины волны согласуются с данными расчетов (рис. 5, б), что свидетельствует об адекватном описании закономерностей трансформации угловых характеристик радиационного поля на основе разработанных нами алгоритмов. (Подчеркнем, что в данном случае мы не ставили задачу подбора входных параметров для максимального соответствия эксперименту.)

В заключение остановимся коротко на реальных возможностях фотометра SE-318 регистрировать угловые распределения диффузной радиации в облачной атмосфере. Как уже отмечалось, частота шага по азимутальному углу наблюдений не всегда позволяет четко определить границы облака, а иногда вообще зафиксировать присутствие облака на небо-своде. Так, в рассматриваемом на рис. 4, а примере фотометр зафиксировал бы только единичный всплеск яркости в области угла $\varphi = 30^\circ$ (кривая с символом «□»), который не позволяет однозначно характеризовать геометрические и оптические параметры облака, попавшего в поле зрения приемника. Для ситуации, представленной на рис. 4, б (азимут облака $\varphi = 130^\circ$), увеличение яркости вообще не было бы зафиксировано, так как измерения выполняются только при углах $\varphi = 120$ и 140° (кривая с символом «□»), где отличия $B_{cl}(\lambda, \varphi)$ и $B_{cl}(\lambda, \varphi)$ не превышают 1–2%.

Заключение

Представлены первые результаты исследований, характеризующие изменение яркости ясного неба в альмукуктарате Солнца $B_{cl}(\lambda, \varphi)$ при появлении на небе отдельного облака $B_{cl}(\lambda, \varphi)$. На основе численного моделирования получены количественные оценки этих изменений в диапазоне азимутальных углов, соответствующих геометрической зоне расположения облака, а также в околооблачном пространстве, где яркость неба формируется под воздействием отраженного от облака диффузного излучения

и эффекта затенения. Обсуждается зависимость относительных различий $K(\lambda, \varphi)$ и $\delta B(\lambda, \varphi)$ между $B_{clr}(\lambda, \varphi)$ и $B_{cld}(\lambda, \varphi)$ от длины волны, условий наблюдения, оптико-геометрических характеристик облака и т.д.

Полученные оценки качественно согласуются с данными натуральных экспериментов. При анализе радиационных измерений, выполненных в автоматическом режиме солнечными фотометрами типа CE-318, следует иметь в виду, что из-за ограниченного набора азимутов не всегда возможно зафиксировать не только наличие облака на небосводе, но и изменение яркости, обусловленное эффектами радиационного воздействия.

Наиболее важный результат состоит в том, что вне относительно небольшой зоны влияния облака отличие яркостей незначительно: $|\delta B(\lambda, \varphi)|$ не превышает величину относительной погрешности расчетов 1,5–2%. Это дает основание для распространения условий применимости некоторых методов солнечной фотометрии атмосферы на малооблачные ситуации. Следующий шаг должен состоять, на наш взгляд, в исследовании того, при каких размерах, количестве и оптической плотности облаков допустимо пренебречь (или учесть) их влиянием на угловые распределения яркости неба, а также предложить конкретные процедуры реализации того или иного метода при наличии на небе отдельных облаков.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 09-05-961, 09-05-963) и программы ОНЗ РАН 7.12.1.

1. *Dubovik O.T., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105. N 16. P. 20673–20696.
2. *Devaux C., Vermeulen A., Deuze J.L., Dubuisson P., Herman M., Santner R.* Retrieval of aerosol single-scattering albedo from ground-based measurements: Application to observational data // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103. N 8. P. 8753–8761.
3. *Wendish M., von Hoyningen-Huene W.* Possibility of refractive index determination of atmospheric aerosol particles by ground-based solar extinction and scattering measurements // *Atmos. Environ.* 1994. V. 28. N 5. P. 785–792.
4. *Yamasoe M., Kaufman Y.J., Dubovic O., Remer L., Holben B., Artaxo P.* Retrieval of the real part of refractive index of smoke particles from Sun/sky measurements during SCAR-B // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103. N 8. P. 31893–31902.
5. *Box M., Sendra C.* Retrieval of the albedo and phase function from exiting radiances with radiative perturbation theory // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 9. P. 1636–1643.
6. *Улюмджиева Н.Н., Чубарова Н.Е., Смирнов А.В.* Характеристики аэрозоля в Москве по данным солнечного фотометра CIMEL // *Метеорол. и гидрол.* 2005. № 1. С. 48–57.
7. *Зинченко Г.С., Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е., Смирнов С.В.* О селекции данных AERONET. Часть 3: облачность и эффективность функционирования солнечных фотометров в южных районах Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21. № 1. С. 19–22.

8. *Henzing J., Knap W., Stammes P., Apituley A., Bergwerff J., Swart D., Kos A., ten Brink H.* Effect of aerosols on downward shortwave irradiances at the surface: Measurements versus calculations with MODTAN4.1 // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. D14204, doi:10.1029/2003JD004142.
9. *Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I.* Cloud Screening and Quality control algorithms for AERONET database // *Remote Sens. Environ.* 2000. V. 73. P. 337–349.
10. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А.* Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.
11. *Dubovik O., Holben B., Eck T., Smirnov A., Kaufman Y., King M., Tanré D., Slutsker I.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59. N 3. P. 590–608.
12. *Матющенко Ю.Я., Ошлаков В.К., Павлов В.Е.* О селекции данных AERONET. Часть I: обоснования методики // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19. № 4. С. 271–277.
13. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Польшкин В.В., Смирнов А., Тащилин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б., Еремлина Т.А.* Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22. № 6. С. 566–574.
14. *Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М.* Моделирование прямого радиационного форсинга аэрозоля для типичных летних условий Сибири. Часть 1: Метод расчета и выбор входных параметров // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22. № 2. С. 163–172.
15. *Holben B., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankoviac I., Smirnov A.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66. P. 1–16.
16. *Назаралиев М.А.* Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1990. 226 с.
17. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I: Детерминированная атмосфера // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21. № 2. С. 99–114.
18. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть 2: Стохастическая облачность // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21. № 3. С. 189–202.
19. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
20. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,37–4 мкм // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20. № 2. С. 156–164.
21. *A preliminary cloudless standat atmosphere for radiation computation.* World Climate Research Programme. WCP-112, WMO/TD № 24, 1986. 60 p.

22. *Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S.* The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. Phillips Laboratory, Geophys. Directorate – Hanscom AFB, MA 01731-3010. 1996. 260 p.
23. *Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана.* Л.: Гидрометеониздат, 1989. 647 с.
24. *Hook S.J.* ASTER Spectral Library: Johns Hopkins University (JHU) spectral library; Jet Propulsion Laboratory (JPL) spectral library; The United States Geological Survey (USGS-Reston) spectral library, 1998. Dedicated CD-ROM. Version 1.2 (см. также <http://speclib.jpl.nasa.gov>).
25. *Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под ред. К.Я. Кондратьева.* Л.: Гидрометеониздат, 1981. 232 с.
26. *Зуев В.Е., Тимов Г.А.* Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1996. 271 с.
27. *Nikolaeva O.V., Bass L.P., Germogenova T.A., Kokhanovskiy A.A., Kuznetsov V.S., Mayer B.* The influence of neighboring clouds on the clear sky reflectance with the 3-D transport code RADUGA // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2005. V. 94. P. 405–424.

T.B. Zhuravleva, T.V. Bedareva, D.M. Kabanov, I.M. Nasrtdinov, S.M. Sakerin. **Specific features of angular characteristics of diffuse solar radiation in little-cloud atmosphere.**

We consider the variations of angular characteristics of diffuse solar radiation during appearance of local inhomogeneities in the form of finite-size separate cloud in the clear sky. Based on the algorithms of the Monte Carlo method, we obtained the quantitative estimates of these variations in solar almucantar as functions of wavelength, optical-geometrical cloud parameters, and observation conditions. The results of the numerical simulation are compared with data of field measurements.