

С.М. Пригарин, Е.А. Белоус

Распространение света от наземных источников в условиях облачности и снегопада (результаты статистического моделирования)

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 7.09.2000 г.

Обсуждаются результаты вычислительного эксперимента, в котором моделировался процесс переноса излучения от стационарных наземных источников в условиях облачности и снегопада. Изучаются эффекты, вызванные многократным переотражением излучения между подстилающей поверхностью и атмосферным слоем: увеличение дальности распространения излучения от точечного источника и возможное усиление потоков излучения около подстилающей поверхности.

1. Модель с поверхностным источником

Рассмотрим следующую модель. Предположим, что подстилающая поверхность является однородным ламбертовским источником единичной мощности. Фотон, излучаемый поверхностью, может либо поглотиться с вероятностью P в атмосферном слое, либо вылететь за атмосферный слой с вероятностью A , либо после рассеяния в атмосферном слое вернуться назад на подстилающую поверхность (с вероятностью $B = 1 - P - A$). В последнем случае фотон либо поглощается на поверхности с вероятностью R , либо отражается от поверхности с вероятностью $Q = 1 - R$ по закону Ламберта.

Таким образом, возможны многократные переотражения фотонов между подстилающей поверхностью и атмосферным слоем. Чем больше вероятность B возвращения фотона на подстилающую поверхность и чем больше альbedo поверхности Q , тем значительнее доля многократно переотраженного излучения. Если Φ_0 – мощность потока, излучаемого поверхностным источником (т.е. поток, излучаемый единичной площадкой подстилающей поверхности за единичный интервал времени), то мощность потока излучения, направленного сверху вниз через единичную площадку подстилающей поверхности, вычисляется по формуле

$$\Phi_1 = \Phi_0 B / (1 - QB).$$

Коэффициент $c_\Phi = \Phi_1 / \Phi_0 = B / (1 - QB)$ будем называть коэффициентом усиления потока (другими словами, c_Φ – это не что иное, как среднее число столкновений фотона с поверхностью). Кроме того, рассмотрим величину

$$c_\perp = \frac{3}{2} \int_0^1 2\pi I_1(\mu) \mu d\mu,$$

где $I_1(\mu)$ – зависимость интенсивности излучения, возвращаемого атмосферным слоем на поверхность, от косинуса $\mu \in [0, 1]$ угла между направлением излучения и нормалью к поверхности:

$$2\pi \int_0^1 I_1(\mu) \mu d\mu = 1.$$

Величина c_\perp отражает степень концентрации излучения, падающего на поверхность в направлении, перпендикулярном к поверхности. Эта величина формально может принимать значения в интервале от 0 до 3/2 (крайнее значение 3/2 соответствует случаю, когда возвращаемое атмосферным слоем излучение падает на поверхность строго перпендикулярно), но фактически в расчетах, результаты которых представлены ниже, величина c_\perp принимала значения меньше единицы. При ламбертовском распределении падающего излучения $I_1(\mu) = \mu/\pi$ и $c_\perp = 1$.

Отметим, что для рассматриваемой плоскопараллельной модели с бесконечно протяженным однородным поверхностным источником освещенность подстилающей поверхности равна Φ_1 и не зависит от диаграммы направленности излучения, возвращаемого на поверхность.

Вычисления, результаты которых приведены в данной статье, проводились для атмосферы с облачным слоем и снегопадом. Предполагалось, что облака и подоблачный слой со снегопадом являются однородными, чисто рассеивающими средами (последнее допущение правдоподобно для видимого диапазона длин волн) с коэффициентами рассеяния σ_{CL} и σ_{SN} соответственно.

Расстояние от поверхности до нижнего края облачности будем обозначать через h , а высоту облачного слоя – через H . Взаимодействие излучения с другими компонентами атмосферы не учитывалось. В качестве индикатрисы рассеяния в облачном слое использовалась модель облака C_1 из [1] для оптического излучения с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм (средний косинус угла рассеяния – 0,86).

В качестве индикатрисы рассеяния снегопада использовалась такая же упрощенная модель, как и в работе [2]: с вероятностью 0,5 происходит изотропное рассеяние (это соответствует преломлению и отражению

лучей на границе случайно ориентированной снежинки) и с вероятностью 0,5 происходит рассеяние, равномерное по углу в малом конусе с осью, совпадающей с направлением вперед (это приближение соответствует дифракции, или малоугловому рассеянию, на снежинке).

Максимальный угол рассеяния θ в конусе зависит от характерного диаметра снежинок d и длины волны λ следующим образом: $\theta = \lambda/d$ (так, например, для $d = 1$ мм, $\lambda = 0,6$ мкм получим $\theta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ рад). Согласно экспериментальным данным снегопады разделяют на три типа в зависимости от характерных размеров снежинок [3]: снегопады с мелкими $d \approx 1$ мм, средними $d \approx 4$ мм, и крупными $d \approx 7$ мм снежинками. Характерные значения коэффициента ослабления σ_{SN} в снегопаде

могут достигать 10^{-2} м^{-1} в зависимости от концентрации и размеров снежинок.

Далее приведены результаты моделирования для значений $d = 4$ мм и $\sigma_{CL} = 20 \text{ км}^{-1}$.

На рис. 1 представлены значения коэффициента усиления потока излучения в зависимости от альbedo подстилающей поверхности. Как видно из результатов, многократное переотражение излучения между подстилающей поверхностью и атмосферным слоем с облачностью и снегопадом может приводить к усилению потока излучения около подстилающей поверхности в несколько раз. В частности, в проведенном вычислительном эксперименте при определенных параметрах (рис. 1,а) наблюдалось почти шестикратное увеличение потока излучения.

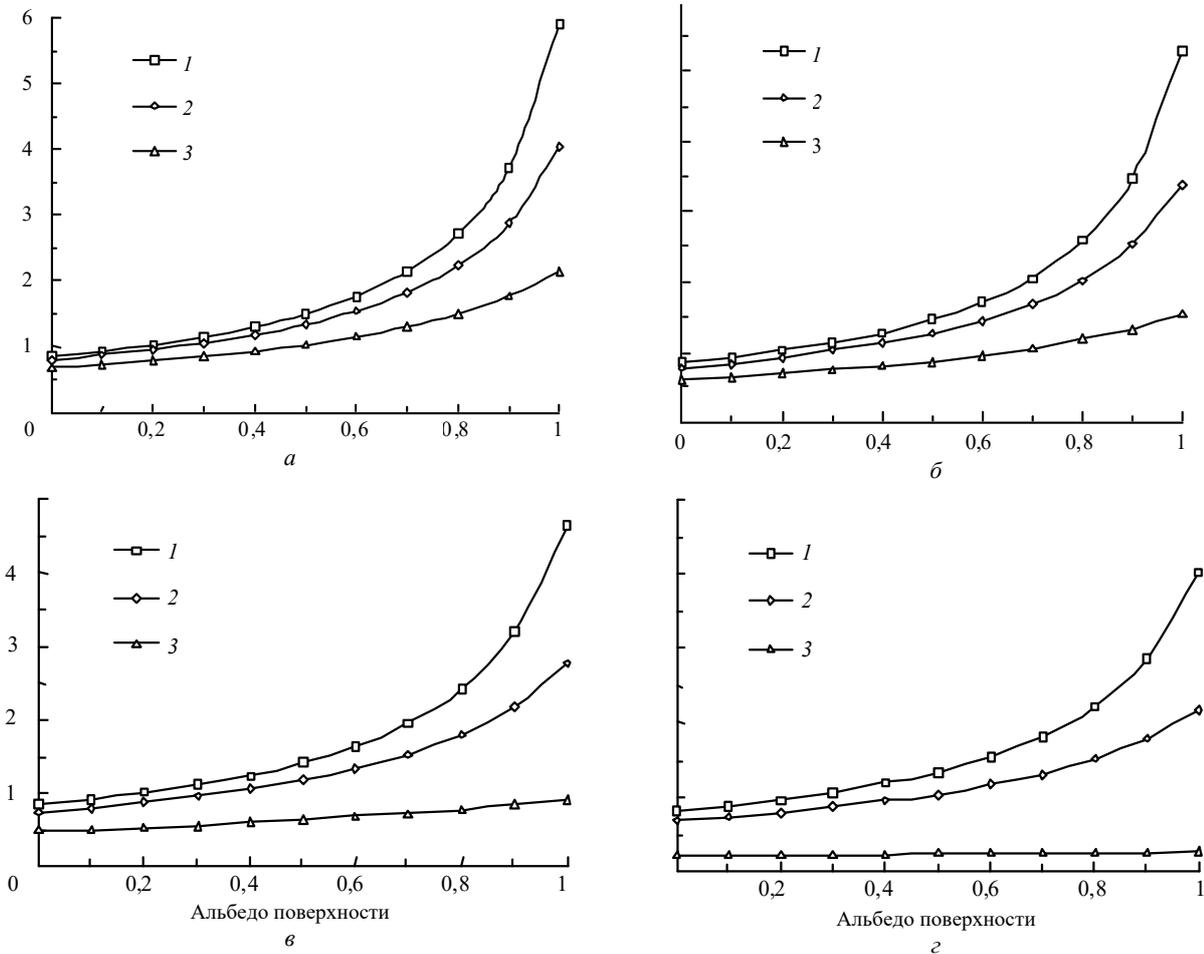


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления потока излучения c_f (среднего числа столкновений фотона с поверхностью) от альbedo подстилающей поверхности Q для различных значений коэффициента рассеяния в снегопаде σ_{SN} и высоты облачного слоя H : $\sigma_{SN} = 10 \text{ км}^{-1}$ (1); 5 км^{-1} (2); 0 км^{-1} (3); $H = 1$ км (а); $0,7$ км (б); $0,4$ км (в); $0,1$ км (г)

Диаграмма направленности излучения, возвращаемого атмосферным слоем на подстилающую поверхность, и величина c_1 в значительной степени зависят от оптической тол-

щины слоя (рис. 2). При достаточно больших оптических толщинах диаграмма направленности близка к линейной, что соответствует закону Ламберта.

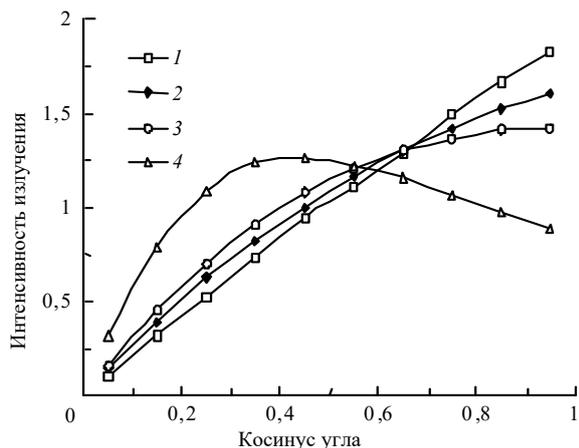


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения, возвращаемого атмосферным слоем на подстилающую поверхность, для $H = 1$ км и $\sigma_{SN} = 10$ км⁻¹ (1), $H = 0,7$ км и $\sigma_{SN} = 0$ км⁻¹ (2), $H = 0,4$ км и $\sigma_{SN} = 0$ км⁻¹ (3), $H = 0,1$ км и $\sigma_{SN} = 0$ км⁻¹ (4). Здесь представлена зависимость интенсивности излучения от косинуса угла между вертикальной осью и направлением падающих лучей. Соответствующие значения c_{\perp} равны 0,99 (1), 0,95 (2), 0,92 (3) и 0,8 (4)

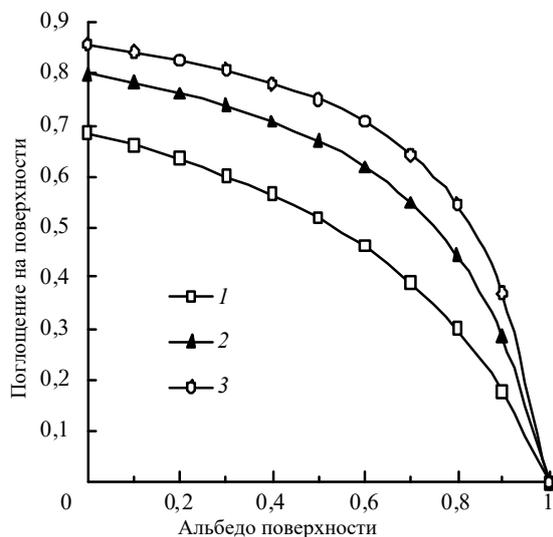


Рис. 3. Доля поглощенного излучения в зависимости от альbedo поверхности для различных значений коэффициента рассеяния в снегопаде: $\sigma_{SN} = 0$ км⁻¹ (1); 5 км⁻¹ (2); 10 км⁻¹ (3); $H = 1$ км, $\sigma_{CL} = 20$ км⁻¹

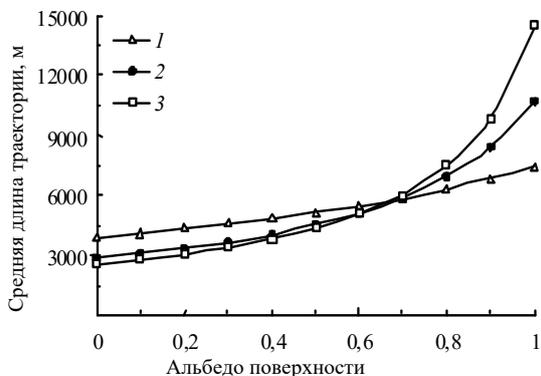


Рис. 4. Средняя длина траектории фотона в среде в зависимости от альbedo поверхности для $\sigma_{SN} = 0$ км⁻¹ (1); 5 км⁻¹ (2); 10 км⁻¹ (3); $h = 1$ км; $H = 0,4$ км; $\sigma_{CL} = 20$ км⁻¹

Примеры зависимостей доли излучения, поглощенной подстилающей поверхностью, а также средних длин траекторий фотонов (до вылета за верхнюю границу облачности или поглощения на подстилающей поверхности) от альbedo поверхности представлены на рис. 3, 4. Выпуклость вверх графиков доли поглощенного излучения объясняется многократным переотражением излучения между подстилающей поверхностью и атмосферным слоем.

2. Модель с точечным источником

Для модели с точечным источником вычислялись освещенность подстилающей поверхности $\Phi(r)$ (рис. 5) и радиальное распределение мощности потока излучения, падающего на поверхность $F(r) = 2\pi r \Phi(r)$ (рис. 6), в зависимости от расстояния до источника r .

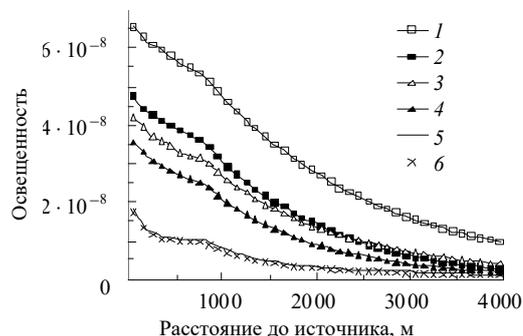


Рис. 5. Освещенность поверхности, Вт/м², в зависимости от расстояния до источника (единичной мощности) для параметров $H = 1$ км и $Q = 1$ (1); $H = 1$ км и $Q = 0$ (2); $H = 0,4$ км и $Q = 1$ (3); $H = 0,4$ км и $Q = 0$ (4); $H = 0,1$ км и $Q = 1$ (5); $H = 0,1$ км и $Q = 0$ (6)

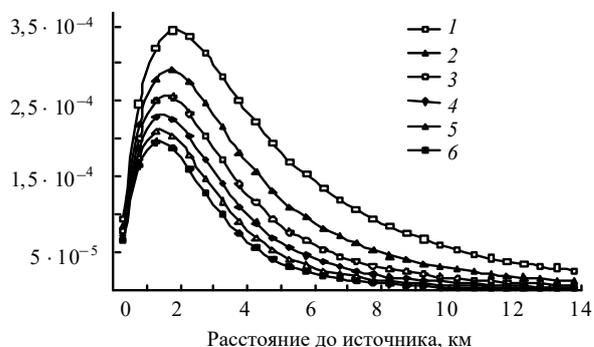


Рис. 6. Радиальное распределение мощности потока $F(r) = 2\pi r \Phi(r)$, Вт/м, где $\Phi(r)$ – освещенность подстилающей поверхности на расстоянии r от источника для различных значений альbedo поверхности: $Q = 1$ (1); 0,8 (2); 0,6 (3); 0,4 (4); 0,2 (5); 0 (6); $h = 1$ км; $H = 1$ км; $\sigma_{CL} = 20$ км⁻¹; $\sigma_{SN} = 0$ км⁻¹

Для рис. 5 и 6 мощность точечного источника предполагается равной 1, $\sigma_{SN} = 0$, а расстояние до нижнего края облачности $h = 1$ км. Отметим наличие перегибов на графиках зависимости освещенности от расстояния до источника (см. рис. 5). Графики на рис. 5 и 6, в частности, показывают, что освещенность подстилающей поверхности на расстоянии около 1 км от точечного источника мощностью в несколько световых киловатт в условиях облачности может быть близкой к освещенности, создаваемой половиной лунного диска в зените ($\approx 0,03$ лк). При наличии снегопада графики освещенности имеют значительно более острый пик в нуле (рис. 7).

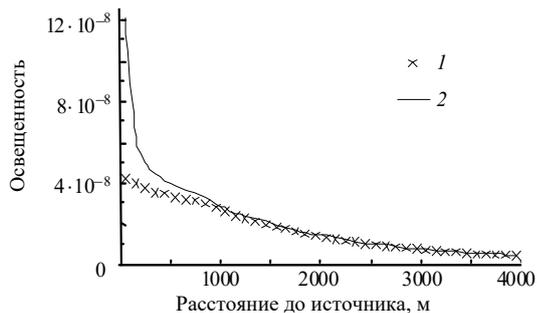


Рис. 7. Освещенность подстилающей поверхности, Вт/м², в зависимости от расстояния до источника единичной мощности; $\sigma_{SN} = 0$ (1), $0,1 \text{ км}^{-1}$ (2); $h = 1 \text{ км}$; $H = 0,4 \text{ км}$; $Q = 1$

3. О влиянии неоднородной структуры облачности на диаграмму направленности излучения, возвращаемого на поверхность

Наряду с простейшей моделью слоистой облачности (однородный слой, ограниченный двумя параллельными плоскостями) в вычислительном эксперименте использовалась гауссовская геометрическая модель кучевой облачности (см. [4]). Кучевые облака предполагались чисто рассеивающими с коэффициентом ослабления $\sigma_{CL} = 50 \text{ км}^{-1}$ и с той же индикатрисой рассеяния (модель облака C_1), которая использовалась для слоистой модели. Параметры кучевой облачности (балл облачности N_0 , характерный диаметр D_0 и средняя высота H_0 облаков) подбирались таким образом, чтобы вероятность B возвращения фотона облачным слоем вниз совпадала с соответствующей вероятностью для слоистого облака с параметрами $H = 200 \text{ м}$ и $\sigma_{CL} = 20 \text{ км}^{-1}$ ($B = 0,32$). На рис. 8 представлены диаграммы направленности излучения, возвращаемого облачным слоем вниз, для слоистого облака и кучевой облачности с параметрами $N_0 = 0,5$, $D_0 = 1 \text{ км}$, $H_0 = 0,7 \text{ км}$.

Под диаграммой направленности для кучевой облачности понимается, естественно, диаграмма направленности, осредненная по горизонтальной плоскости. Отметим, что для кучевой облачности величина c_{\perp} несколько больше, чем для слоистой. Для другого набора параметров кучевой облачности: $N_0 = 0,5$, $D_0 = 0,2 \text{ км}$, $H_0 = 0,43 \text{ км}$, вероятность возвращения фотона также приблизительно равна $0,32$, а диаграмма направленности практически совпала с диаграммой направленности для модели слоистого облака.

S.M. Prigarin, E.A. Belous. Light propagation in clouds and snowfall for earth-based radiants (results of Monte Carlo simulation).

In the paper we present the results of numerical modeling of radiation transfer in clouds and snowfall for stationary earth-based sources of light. We study the following effects caused by multiple light reflection between Earth's surface and atmosphere with clouds and snowfall: the increase of the distance of the light propagation for a point source and possible intensification of luminous flux near the surface.

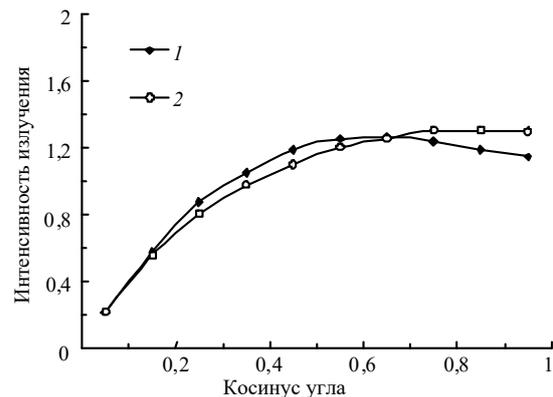


Рис. 8. Диаграмма направленности излучения, возвращаемого на подстилающую поверхность, для слоистой облачности (1) с параметрами $H = 0,2 \text{ км}$, $\sigma_{CL} = 20 \text{ км}^{-1}$ и для кучевой облачности (2) с параметрами $H_0 = 0,7 \text{ км}$, $\sigma_{CL} = 50 \text{ км}^{-1}$, $N_0 = 0,5$, $D_0 = 1 \text{ км}$. Здесь представлена зависимость интенсивности излучения от косинуса угла между вертикальной осью и направлением падающих лучей. Значения c_{\perp} равны $0,86$ (1); $0,89$ (2)

В заключение отметим, что эффекты, вызываемые многократным переотражением излучения между подстилающей поверхностью и атмосферным слоем для модели с плоскопараллельным источником на верхней границе атмосферы, исследовались в работе [5]. В частности, авторы [5] сделали вывод о том, что наличие тонких облачных слоев может приводить к таким эффектам, как увеличение средней интенсивности солнечного излучения около поверхности земли и уменьшение альбедо системы «атмосфера – подстилающая поверхность».

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 98-01-00685, 00-01-00797, 00-05-65456) и INTAS (проект № IR-97-1441).

1. Деърменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 290 с.
2. Боровой А.Г., Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Каргин Б.А., Пригарин С.М. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 227–233.
3. Жуков А.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 1. С. 33–36.
4. Prigarin S.M., Kargin B.A. and Oppel U.G. // Pure and Applied Optics. A. 1998. V. 7. № 6. P. 1389–1402.
5. Prigarin S.M. and Oppel U.G. // Pure and Applied Optics. A. 1998. V. 7. № 6. P. L79–L83.