

С.Ю. Попов, Г.А. Титов

СРЕДНИЕ ПОТОКИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ СО СЛУЧАЙНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕЙ

На основе алгоритма моделирования гауссовских случайных полей строится модель сплошной слоистой облачности со стохастически неоднородной верхней границей. Данная модель позволяет учитывать влияние на распространение солнечного излучения в сплошных облаках таких эффектов, как наличие оптически тонких участков, радиационное взаимодействие отдельных <валов>, взаимное затенение. Расчеты средних лучистых потоков проведены в рамках метода численного моделирования полей облачности и радиации. Отличия средних потоков солнечного излучения в сплошной облачности с неровной верхней границей от этих же характеристик плоского облачного слоя максимальны при малых зенитных углах Солнца и могут достигать десятков процентов.

Для реальных облаков характерна экстремальная пространственная неоднородность оптических свойств, обусловленная сложной нерегулярной геометрией и макромасштабными флуктуациями водности, фазового состава и спектра размеров капель воды (кристаллов льда). В природе эти неоднородности присутствуют одновременно, а вариации геометрической толщины и коэффициента ослабления облаков могут достигать существенных значений [1]. Визуальные наблюдения темных и светлых участков на нижней границе сплошной облачности не позволяют однозначно ответить на вопрос: Какой вклад в их формирование вносят макромасштабные флуктуации оптических параметров и стохастическая геометрия облаков? Другими словами, мы не можем однозначно интерпретировать, например, светлый участок как область с пониженным значением коэффициента ослабления (или геометрической толщины) облаков. Надежные данные о вертикальной геометрической структуре и статистической взаимосвязи между оптическими и геометрическими параметрами облаков, полученные с высоким пространственным разрешением, практически отсутствуют, что осложняет построение адекватных моделей облаков.

Вследствие нелинейности зависимости радиационного режима и полей яркости от геометрии и оптических свойств облаков использование в расчетах средних значений каких-либо параметров, например, оптической толщины, не позволяет правильно оценить влияние флуктуаций оптических характеристик облаков на модулируемое ими радиационное поле. К настоящему времени предложен ряд моделей, позволяющих учесть влияние стохастической геометрической структуры поля кучевых облаков на радиационный режим и поля яркости системы <атмосфера – подстилающая поверхность> (см., например, [2, 3, 4]). Что касается сплошных слоистообразных облаков, то наиболее широко используемой их моделью по-прежнему является плоский однородный слой. Модель плоского слоя вертикально-однородной мутной среды с горизонтальными непрерывными периодическими вариациями коэффициентов рассеяния и поглощения использована при изучении влияния пространственной неоднородности оптических характеристик облаков на радиационные процессы в атмосфере [5, 6].

В настоящей статье используется модель [2], основанная на алгоритме моделирования однородного изотропного гауссовского поля [7, 8] и позволяющая учесть стохастичность геометрии верхней границы слоистых облаков при детерминированных оптических характеристиках. С помощью метода численного моделирования полей облачности и радиации [9] исследуются зависимости средних потоков видимого солнечного излучения от параметров, описывающих случайную геометрию верхней границы.

1. Модель слоистой облачности со случайной верхней границей

Идея использовать гауссовские случайные поверхности для моделирования облачных полей со случайной геометрией предложена в [10]. Детальное математическое описание алгоритма построения таких поверхностей и согласования входных параметров модели с экспери-

ментально измеряемыми величинами дано в [2]. Для ясности и цельности изложения приведем краткое описание модели. Предположим, что облачность ограничена снизу плоскостью $z = H_0$, верхняя граница $z = w(x, y)$ задается выражением

$$w(x, y) = H_0 + \max(\nu(x, y) + H, 0), \quad (1)$$

где H – средняя толщина облачного слоя; $\nu(x, y)$ – однородное гауссовское поле с нулевым средним, корреляционной функцией $K(x, y)$ и дисперсией $\sigma^2 = K(0, 0)$. Такая модель однозначно задается величинами H , σ и корреляционной функцией $K(x, y)$. Для численного построения реализаций поля (1) использована модификация метода рандомизации спектра, предложенного в [7] для моделирования изотропного поля, так как на первоначальном этапе исследований логично ограничиться случаем изотропной облачности. Корреляционная функция такого поля имеет вид $K(x, y) = K(r) = \sigma^2 J_0(\rho r)$, где $r^2 = x^2 + y^2$, J_0 – функция Бесселя. В этом случае моделирующая формула записывается в виде

$$\nu(x, y) = \frac{\sigma}{\sqrt{I}} \sum_{i=1}^I \sqrt{-\ln(\alpha_i)} \cos((x \rho \cos \omega_i + y \rho \sin \omega_i) + 2\pi \beta_i), \quad (2)$$

здесь ρ , ω_i – полярные координаты точек спектра; α_i , β_i – независимые случайные величины, равномерно распределенные на промежутке $[0, 1]$; число разбиений спектрального пространства на секторы $I = 10$. Такая модель использована в [2] для имитации полей кучевой облачности. Нетрудно заметить, что при $\sigma \leq (1/3)H$ описываемое поле (1) можно использовать в качестве математической модели сплошной слоистой облачности со случайной верхней границей. В качестве величин, характеризующих средние вертикальные и горизонтальные размеры неоднородностей, целесообразно использовать квадратичное отклонение σ и радиус корреляции $r_c \approx 1,75/\rho$ соответственно.

2. Численные результаты

Как отмечалось выше, зависимость радиационного поля от оптических и геометрических характеристик облаков является нелинейной, и случайная геометрия верхней границы слоистой облачности может оказывать существенное влияние на перенос солнечной радиации. Рассмотрим факторы, влияющие на формирование средних потоков излучения. В отличие от плоскопараллельного облачного слоя в модели с неровной верхней границей (см. рис. 1) в облачности появляются:

- 1) области в среднем оптически менее плотные, через которые, если они не попадают в зону тени, увеличивается поток прямой радиации и из-за сильной вытянутости вперед индикатрисы рассеяния – поток рассеянной пропущенной радиации;
- 2) области в среднем оптически более плотные, увеличивающие альbedo облаков;
- 3) многократное переизлучение между облачными <валами>, приводящее к увеличению альbedo.

Это основные физические эффекты, обусловленные случайной геометрией верхней границы облачного слоя и определяющие перенос излучения. Последний эффект зависит от величины телесного угла, под которым из каждой точки на одном облачном <вале> виден другой, и чем больше этот угол, тем больше вероятность того, что фотон испытает дополнительное рассеяние в окружающих облачных <валах>. Таким образом, с увеличением отношения между средними вертикальными и горизонтальными размерами неоднородностей должно усилиться радиационное взаимодействие отдельных облачных <валов>.

Ниже представлены результаты расчетов средних альbedo $\langle R \rangle$, пропускания прямой $\langle S \rangle$ и диффузной $\langle Q_s \rangle$ радиации, где угловые скобки обозначают среднее по ансамблю реализаций облачного поля. Облака считались чисто рассеивающей средой, а индикатриса рассеяния соответствует облаку C_1 и длине волны $\lambda = 0,69$ мкм [11]. Рассеяние во внеоблачной атмосфере и отражение от подстилающей поверхности не учитывались. Очевидно, что значение $\sigma = 0$ соответствует модели, представляющей собой слой с плоскопараллельными границами. Обо-

значим через $\delta R = (\langle R(0) \rangle - \langle R(\sigma) \rangle) / \langle R(\sigma) \rangle$ относительное отклонение среднего альbedo $\langle R(\sigma) \rangle$ от альbedo $\langle R(0) \rangle$ плоскопараллельного облачного слоя со средней толщиной H . Аналогичные обозначения используются для пропущенной рассеянной радиации. Относительная погрешность вычисления лучистых потоков не превышает 1%.

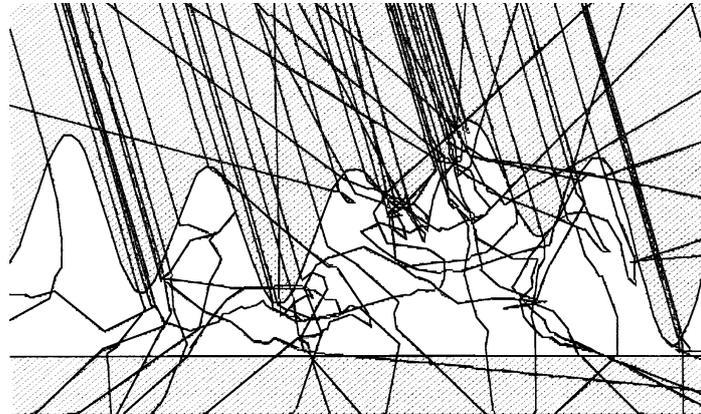


Рис. 1. Сечение облачности, построенной на основе модели (1), вертикальной плоскостью $y = 0$ и реализации траекторий фотонов

С увеличением дисперсии σ^2 уменьшается минимальная геометрическая толщина облачного слоя H_{\min} и, следовательно, уменьшается оптическая толщина области, локализованной вблизи H_{\min} . Из-за сильной вытянутости вперед индикатрисы рассеяния облаков значительная доля излучения, взаимодействующего с данной областью, будет проходить через облачный слой. По этой причине среднее альbedo должно уменьшаться, а среднее пропускание должно возрастать, что подтверждается результатами расчетов, представленными на рис. 2. Здесь и далее ξ_{\odot} – зенитный угол Солнца; Σ – коэффициент ослабления. При уменьшении радиуса корреляции в среднем уменьшается $\langle \text{период} \rangle$ флуктуаций и доля оптически тонких областей в среднем увеличивается; этим объясняется уменьшение $\langle R(\sigma) \rangle$ и возрастание $\langle Q_s(\sigma) \rangle$ при уменьшении r_c . Такая изменчивость поведения $\langle R(\sigma) \rangle$ и $\langle Q_s(\sigma) \rangle$ при вариациях горизонтального размера неоднородностей качественно согласуется с результатами, полученными в [5] для плоского слоя с горизонтальными вариациями коэффициентов рассеяния и поглощения.

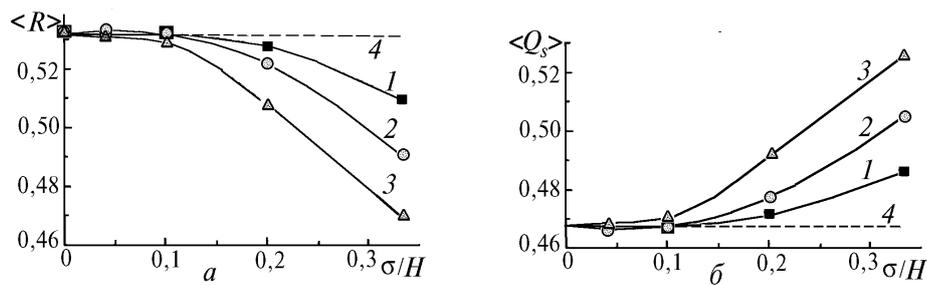


Рис. 2. Зависимость $\langle R \rangle$ (а) и $\langle Q_s \rangle$ (б) от безразмерного параметра σ/H при $\xi_{\odot} = 0^\circ$, $\Sigma = 30 \text{ км}^{-1}$, $H = 0,5 \text{ км}$ и различных радиусах корреляции $r_c = 0,233$ (1); $0,117$ (2); $0,05 \text{ км}$ (3); 4 – соответствует плоскому слою

Очевидно, что при $\Sigma \rightarrow 0$ и $\Sigma \rightarrow \infty$ средние потоки будут нечувствительны к флуктуациям верхней границы облачного слоя и значения δR и δQ_s будут стремиться к нулю (рис. 3). Среднее альbedo наиболее сильно зависит от дисперсии верхней границы при средних оптических толщинах $\langle \tau \rangle \sim 20-30$, где δR достигает максимального значения. При $\Sigma \leq 120 \text{ км}^{-1}$ величина $|\delta Q_s|$ монотонно возрастает с увеличением Σ и достигает $\sim 30\%$. Последнее представляется особенно важным в тех случаях, когда отражение от подстилающей поверхности не описывается законом Ламберта и сильно зависит от угловой структуры падающего излучения.

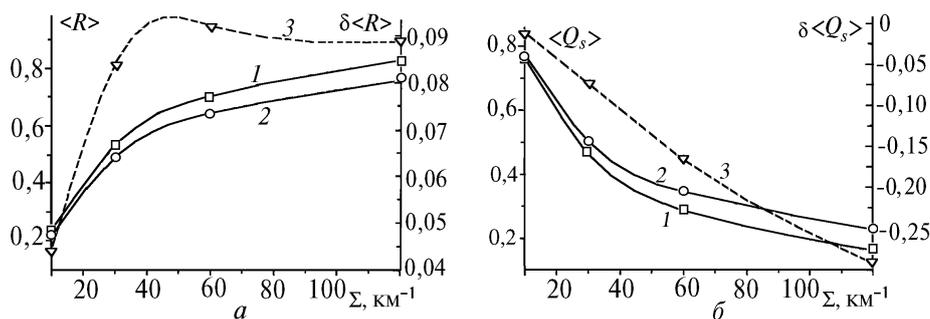


Рис. 3. Зависимость $\langle R \rangle$ (а) и $\langle Q_s \rangle$ (б) от коэффициента ослабления при $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$, $H = 0,5$ км, $r_c = 0,117$ км и различных $\sigma/H = 0$ (1) и $\sigma/H = 1/3$ (2); пунктирные кривые – δR и δQ_s при $\sigma/H = 1/3$

При увеличении зенитного угла Солнца происходит затенение оптически тонких областей окружающими облачными <валами>, поэтому уменьшается различие между средними потоками, рассчитанными для облачных слоев с плоскопараллельными и неровной верхней границами (рис. 4). При $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$ значения δR и δQ_s достигают примерно 8–10%. При зенитных углах Солнца больше 60° эти различия порядка относительной погрешности вычислений ($\leq 1\%$) и ими можно пренебречь.

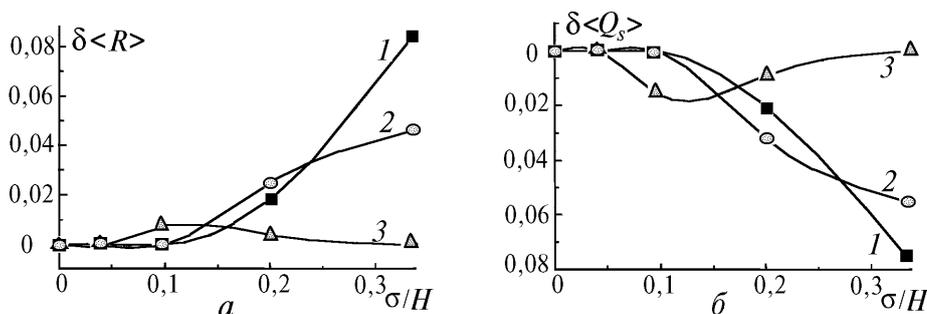


Рис. 4. Средние потоки при $\Sigma = 30$ км $^{-1}$, $H = 0,5$ км, $r_c = 0,117$ км и различных зенитных углах Солнца $\xi_{\odot} = 0$ (1), 30 (2) и 60° (3)

Известно, что вне полос поглощения атмосферных газов решение уравнения переноса в горизонтально однородном плоском слое мутной среды является инвариантным относительно оптической толщины. Для того, чтобы облачные слои и траектории квантов оставались подобными в случае облачного слоя со случайной верхней границей, необходимо сохранить неизменными следующие параметры:

- среднюю оптическую толщину $\langle \tau \rangle = \Sigma H$;
- отношение среднего вертикального размера к горизонтальному σ/r_c ;
- отношение σ/H .

При неизменных указанных выше параметрах средние потоки практически совпадают (рис. 5), различия не превышают относительную погрешность вычислений.

Требования к точности вычисления потоков солнечной радиации повышаются, поэтому стохастическую геометрию верхней границы слоистых облаков необходимо учитывать при разработке радиационных облаков в численных моделях общей циркуляции атмосферы. Средние потоки наиболее чувствительны к флуктуациям верхней границы при малых зенитных углах Солнца, когда значительная часть излучения может проходить через оптически тонкие области, расположенные вблизи минимальной геометрической толщины слоистых облаков.

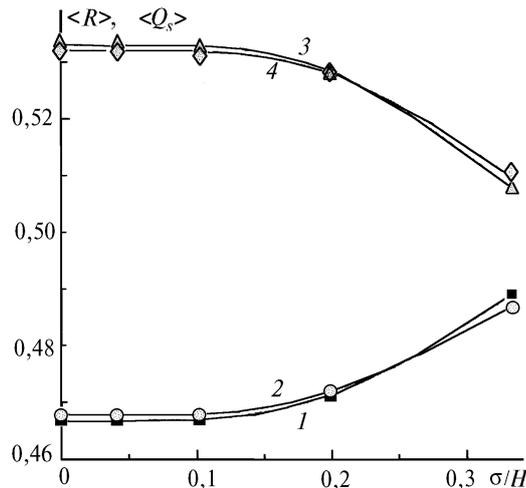


Рис. 5. Зависимость средних потоков $\langle Q_s \rangle$ (кривые 1, 2) и $\langle R \rangle$ (3, 4) от безразмерного параметра σ/H при $\xi_0 = 0^\circ$:
 1, 3 – $\Sigma = 60 \text{ км}^{-1}$, $H = 0,25 \text{ км}$, $r_c = 0,117 \text{ км}$; 2, 4 – $\Sigma = 30 \text{ км}^{-1}$, $H = 0,5 \text{ км}$, $r_c = 0,233 \text{ км}$

При подготовке данной статьи была оказана частичная финансовая поддержка со стороны Министерства Энергетики США в виде гранта N DE-FG02-91ER61128.

1. Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
2. Каргин Б.А., Пригарин С.М. Моделирование стохастических полей кучевой облачности и исследование их радиационных свойств методом Монте-Карло. Новосибирск. 1988. 18 с. (Препринт / ВЦ СО АН СССР, N 817).
3. Бабич Е.А., Титов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 7. С. 757–765.
4. Титов Г.А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 4. С. 3–18.
5. Романова Л.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1991. Т. 27. N 5. С. 519–530.
6. Романова Л.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1992. Т. 28. N 3. С. 268–276.
7. Михайлов Г.А. // ДАН СССР. 1978. Т. 238. N 4. С. 793–795.
8. Михайлов Г.А. // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1983. Т. 23. N 3. С. 558–566.
9. Титов Г.А. Статистическое описание переноса оптического излучения в облаках: Дис. ... докт. физ.-мат. наук (01.04.05). Томск: ИОА СО АН СССР, 1988. 361 с.
10. Стохастическая структура полей облачности и радиации. // Муллама Ю.-А.Р., Сулев М.А., Пылдмаа В.К. и др. Тарту: ИАФА АН ЭССР, 1972. 281 с.
11. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.

Институт оптики атмосферы
 СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
 22 ноября 1993 г.

S.Yu. Popov, G.A. Titov. **Mean Solar Radiation Fluxes in Stratus Clouds with a Random Upper Boundary.**

This paper presents a model of stratus clouds with a stochastically nonuniform upper boundary constructed using an algorithm of numerical simulation of random Gaussian fields. This model allows for the influence of optically thin cloud areas, radiation interaction of individual cloud billows, and shading on the solar radiation propagation. Calculations of the mean radiation fluxes are done based on numerical simulation of the radiation and cloudiness fields. Difference of the mean fluxes of solar radiation in solid cloud cover with a ragged upper boundary from that in cloudiness with a smooth plane boundary reaches its maximum at small zenith angles of the Sun and can amount tens per cent.