

УДК 551.521.31+51-73:535

Влияние 3D-эффектов облаков на пространственно-угловые характеристики поля отраженной солнечной радиации

Т.Б. Журавлева, И.М. Насртдинов, Т.В. Русскова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 4.04.2016 г.

Моделирование пространственно-угловых характеристик отраженной солнечной радиации в разорванной облачности выполнено в сферической модели атмосферы с использованием статистических алгоритмов, развитых в ИОА СО РАН. Рассматриваются закономерности формирования полей яркости рассеянного излучения, обусловленные конечными размерами облаков, их взаимным затенением и переотражением излучения соседними облачными элементами (на примере отдельных облачных реализаций). Показано, что при малых и средних баллах облачности особенности поля яркости отраженной солнечной радиации определяются в основном локализацией облаков относительно направления визирования и направления «на Солнце».

Ключевые слова: солнечная радиация, метод Монте-Карло, изолированное облако, разорванная облачность, 3D-эффекты облаков; solar radiation, Monte Carlo method, isolated cloud, broken clouds, cloud 3D effects.

Введение

Оперативные алгоритмы, предназначенные для восстановления оптических и микрофизических характеристик облаков и аэрозоля по данным спутниковых измерений солнечной радиации, основаны на решении уравнения переноса излучения в горизонтально-однородной модели атмосферы Земли. При использовании такого приближения предполагается, что радиационные свойства отдельного пикселя не зависят от окружающих его элементов. Вместе с тем во многих исследованиях показано (см., например, [1–4]), что присущая облачным полям неоднородная структура оказывает существенное воздействие на результаты восстановления свойств облачности. Не менее важным является учет влияния облаков на восстановление характеристик аэрозоля (аэрозольной оптической толщи (АОТ), показателя Ангстрема, доли мелкодисперсной фракции) в безоблачных промежутках вблизи облачных пикселей [5–9]. На основе анализа радиационных измерений, выполненных с поверхности Земли и из космоса, ряд авторов [6, 8–10] отмечают увеличение яркости неба в этих областях пространства.

Исключая влияние инструментальных особенностей радиометров, причины возрастания яркости вблизи облаков условно разделяют на две группы: облачно-аэрозольное взаимодействие (увеличение размеров и концентрации аэрозольных частиц, присутствие облачных частиц, вышедшие за «границы» облака и т.д. [8, 11, 12]) и 3D-эффекты облаков [5, 9, 13].

На сегодняшний день не существует оценок относительного вклада каждой из этих составляющих в изменение спектрально-угловых характеристик отраженной солнечной радиации. Вместе с тем выполненные на основе спутниковых данных исследования подтверждают, что некоторые закономерности формирования яркости неба (яркость безоблачных промежутков увеличивается сильнее с освещенной Солнцем стороны и вблизи оптически плотных облаков, а также на более коротких длинах волн) могут быть обусловлены влиянием именно 3D-эффектов облаков [7, 9, 13, 14].

Теоретические оценки изменения яркости неба вблизи облаков немногочисленны и получены с использованием достаточно простых облачных моделей: изолированное облако в виде прямоугольного параллелепипеда [15], бесконечно протяженная полоса [16], горизонтальное полубесконечное облако [17, 18]. В настоящей работе рассматриваются результаты численного моделирования угловых характеристик отраженной солнечной радиации в присутствии изолированного облака (опрокинутый усеченный параболоид) и мезомасштабных облачных полей (модель на основе пуассоновских потоков точек в пространстве) в видимой области спектра. Цель работы состоит в 1) выявлении основных факторов, определяющих особенности формирования полей яркости разорванной облачности и 2) сопоставлении яркостей неба в отсутствие и при наличии облаков в зависимости от геометрической схемы эксперимента и конфигурации облаков в пространстве.

1. Модель и метод решения

Моделирование угловых характеристик радиационного поля выполнялось в сферической модели

* Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов (wizard@iao.ru); Татьяна Владимировна Русскова (btv@iao.ru).

атмосферы, заданной в глобальной Декартовой системе координат $OXYZ$ (ГСК), центр которой совпадает с центром Земли (точка O), а ось OZ определяется положением приемника (точка A) на верхней границе атмосферы (ВГА). Результаты численного моделирования представляются в локальной системе координат $O'X'Y'Z'$ (ЛСК), которая определяется центром $O' = O$ и осью $O'Z'$, проходящей через точку наблюдения A' на поверхности Земли (рис. 1, *a*). Направления «на детектор» и «на Солнце» в ЛСК задаются зенитными и азимутальными углами: $\omega_{det} = (\xi_{det}, \varphi_{det})$ и $\omega_{Sun} = (\xi_{Sun}, \varphi_{Sun})$. Зенитные углы отсчитываются от положительного направления оси $O'Z'$. Положительное направление оси $O'X'$ выбрано таким образом, что $\varphi_{det} = 180^\circ$. Азимутальный угол $\varphi_{Sun} = 0$ соответствует конфигурации, когда в плоскости $O'X'Z'$ детектор и Солнце расположены по разные стороны от оси $O'Z'$, а при $\varphi_{Sun} = 180^\circ$ Солнце находится «за спиной» наблюдателя. Переход от ЛСК к ГСК выполняется по элементарным формулам.

Количество центров облаков N в реализации площадью S разыгрывается по закону Пуассона и определяется соотношением [19]:

$$N = \min\{i : \prod_{k=0}^i \alpha_k < e^{-\eta S}\},$$

$$\eta = -\ln(1 - 0,1 \cdot CF) / S_{sec}, \quad (1)$$

где CF – балл облачности (изменяется от 0 до 10); S_{sec} – площадь основания облака. Моделирование равномерно распределенных точек (центров облаков) на криволинейной поверхности выполняется в соответствии с подходом [20]. Облака аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболоидами вращения с полуосями основания $R_x = R_y$ и геометрической толщиной H_{cld} . Поскольку количество облаков определяется случайным образом и их основания могут пересекаться, после моделирования реализации мы рассчитывали реальный балл облачности CF_1 , который мог отличаться от заданного значения CF в формуле (1). В данной работе для моделирования радиационных характеристик отбирались такие реализации облачного поля, в которых различие $|CF - CF_1|$ не превышало 0,1. Центр облака определяется в сдвинутой локальной системе координат ($O' \rightarrow A'$) $X'Y'Z'$ расстоянием между точкой наблюдения A' и проекцией центра параболоида на Землю (C), азимутальным углом φ_{cld} между лучами $A'X'$ и $A'C$ и высотой центра основания облака над поверхностью Земли Z_{cld} (рис. 1, *б*).

Моделирование рассеянной солнечной радиации в детерминированной горизонтально и вертикально неоднородной атмосфере выполнено с использованием развитых нами статистических алгоритмов на основе метода сопряженных блужданий [21, 22]. В соответствии с оценками эффективности при расчете радиационных характеристик использовались различные модификации этого метода, отличающиеся способом моделирования длины свободного пробега: канонические процедуры аналогового моделирования

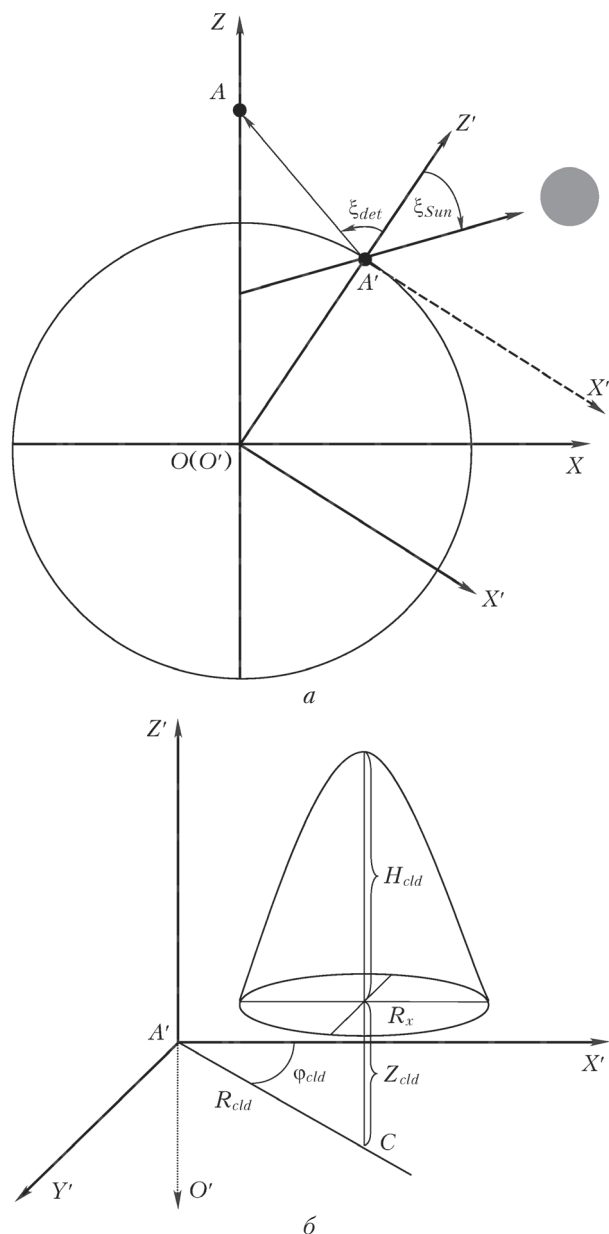


Рис. 1. Локальная и глобальная системы координат при наблюдении из космоса (*a*) и схема расположения облака в локальной системе координат (*б*)

в малооблачных ситуациях и метод максимального сечения при больших баллах облачности [23]. Учет молекулярного поглощения выполнен в предположении, что функция пропускания атмосферными газами представляется в виде короткого ряда экспонент (метод k -распределений).

На верхнюю границу атмосферы (ВГА = 100 км) падает параллельный поток монохроматического солнечного излучения мощностью πS_λ . Падающее излучение отражается от подстилающей поверхности (ПП) по закону Ламберта. Оптические характеристики вертикально неоднородной аэрозольно-молекулярной атмосферы (коэффициенты ослабления, индикатрисы и альbedo однократного рассеяния излучения аэрозольными частицами, коэффициенты

молекулярного рассеяния и поглощения) задаются в виде кусочно-постоянных функций согласно моделям [24, 25]. В областях пространства, занятых облачными элементами, оптические характеристики определяются по стандартным правилам смеси в среде, состоящей из различных компонентов (облака, аэрозоль, молекулы воздуха).

В работе представлены результаты моделирования яркости неба в видимой области спектра (0,55–0,555 мкм). Параметры облаков фиксированы: $R_x = H_{cld} = 5$ км; $Z_{cld} = 2$ км; коэффициент ослабления $\sigma_{cld} = 5$ км⁻¹; альbedo ПП равнялось 0,106 (трава, [26]), оптическая толщина аэрозоля полагалась равной АОТ(0,55 мкм) = 0,15.

2. Изолированное облако

Анализ результатов численного моделирования показал, что формирование яркости неба в присутствии изолированного облака зависит от совокупности факторов, которые можно условно разделить на геометрические (направления визирования и условия освещенности, вертикальные и горизонтальные размеры облака, положение облака в пространстве) и оптические (оптическая толщина, индикатриса и альbedo однократного рассеяния облачных час-

тиц). Ниже обсуждаются эффекты, обусловленные влиянием геометрических факторов.

Моделирование пространственных и угловых характеристик поля яркости неба выполнено в предположении, что плоскость $O'X'Y'$, которой принадлежит линия визирования (ЛВ), делит облако на две равные части. Отрицательные значения R_{cld} соответствуют положению облака «левее» точки наблюдения (ТН) A' («ближе» к находящемуся в космосе приемнику, $\varphi_{cld} = 180^\circ$); при $R_{cld} > 0$ облако расположено «правее» точки наблюдения ($\varphi_{cld} = 0$). Рассматриваются различные геометрические схемы эксперимента, отличающиеся углами детектора и условиями освещенности ($\varphi_{Sun} = 0$ и $\varphi_{Sun} = 180^\circ$).

Случай $\varphi_{Sun} = 0$ (приемник и Солнце располагаются «друг против друга», рис. 2, а).

Если облако расположено на достаточно большом расстоянии от точки наблюдения, оно практически не влияет на яркость неба (зона 1 и зона 4, рис. 2, а). При фиксированных параметрах облака и условиях освещенности границы этих зон зависят от зенитного угла детектора. Например, при $\xi_{det} = 80^\circ$ яркости неба в присутствии облака (I_{cld}) и в его отсутствие (I_{clr}) практически не отличаются, если расстояние между проекцией центра облака и точкой наблюдения превышает примерно 40 км; для $\xi_{det} = 30^\circ$

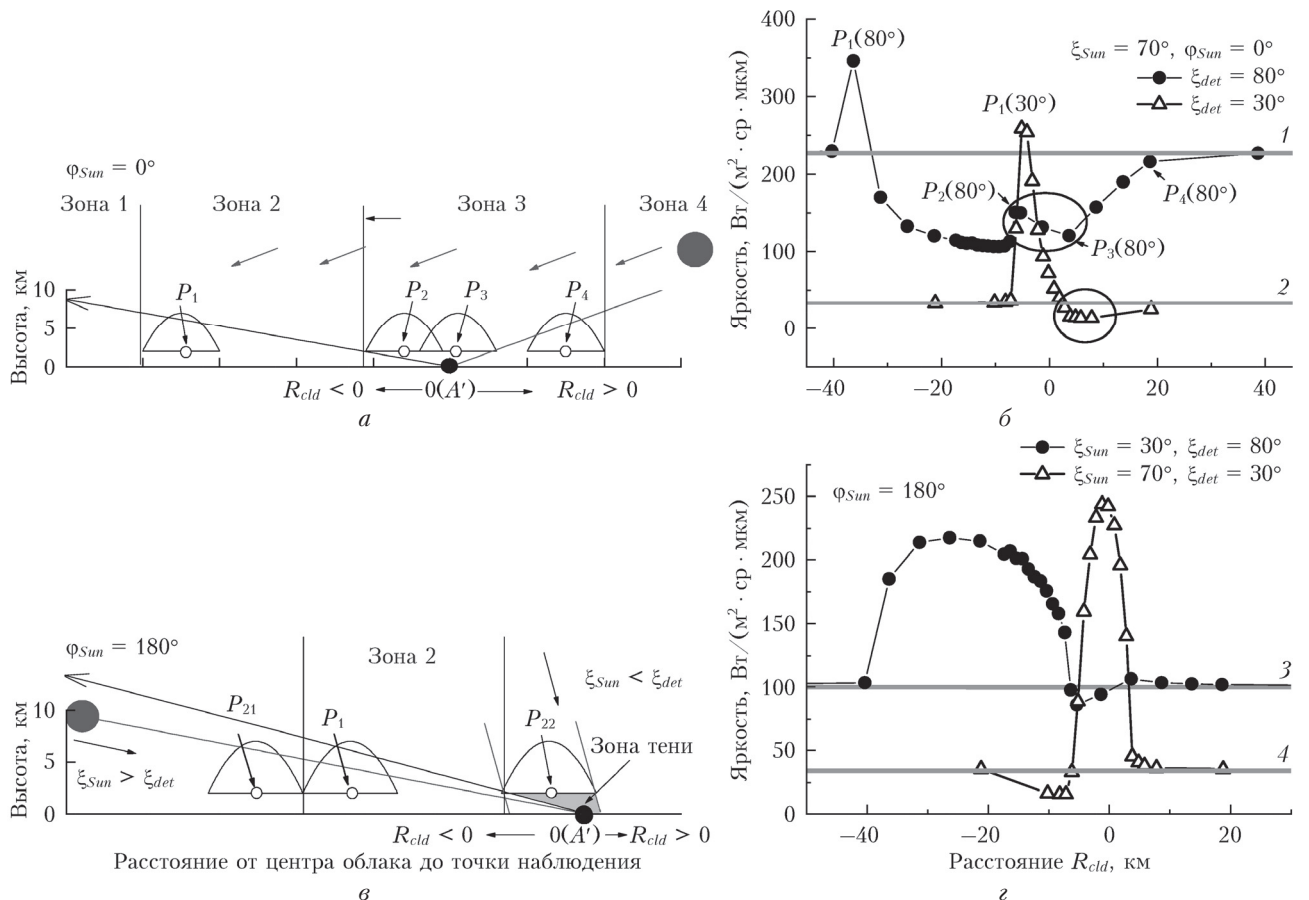


Рис. 2. Схема зондирования изолированного облака при различных условиях освещенности (а, в); зависимость яркости неба в присутствии облака для различных условий освещенности в сравнении с безоблачными условиями (прямые линии 1–4) (б, з)

радиус зоны влияния облака сужается до 20 км (рис. 2, б). По мере приближения облака к ЛВ его влияние будет проявляться за счет отраженной от облака радиации. Однако дополнительная подсветка линии визирования существенно больше, если приемник направлен на освещенную Солнцем сторону облака ($\varphi_{Sun} = 180^\circ$).

В зоне 2 облако находится на линии визирования (точка P_1) и яркость неба I_{cld} формируется под воздействием двух противоположных факторов. С одной стороны, по мере приближения облака к точке A' на ЛВ увеличивается — по сравнению с безоблачной атмосферой — количество рассеивателей, что способствует возрастанию яркости. Учитывая, что облако аппроксимировано усеченным параболоидом, при его движении к точке наблюдения их количество сначала растет, а затем падает. С другой стороны, имеет значение длина оптического пути фотона в облаке (на языке теории однократного рассеяния она определяется суммой оптических путей фотона 1) от точки его входа в облако до ЛВ и 2) от точки рассеяния на ЛВ до выхода из облака). С увеличением длины оптического пути фотона в облаке яркость неба уменьшается.

При «вступлении» облака на ЛВ доминирующими факторами являются увеличение числа рассеивателей и сравнительно небольшая длина оптического пути фотона в пределах облачного элемента. Вследствие этого I_{cld} резко возрастает по сравнению с яркостью безоблачной атмосферы I_{clr} (точки $P_1(30^\circ)$ и $P_1(80^\circ)$ на рис. 2, б). По мере приближения центра облака к точке наблюдения влияние второго фактора усиливается, что обуславливает падение яркости неба и ее уменьшение по сравнению с I_{clr} .

Границей между зонами 2 и 3 является точка P_2 , когда линия визирования не пересекает облако и дополнительного ослабления излучения вдоль этого направления в пределах облака не происходит (рис. 2, а). При фиксированных размерах облака формирование яркости определяется его положением относительно точки наблюдения и условиями освещенности: 1) при различных сочетаниях ξ_{det} и ξ_{Sun} нижняя часть ЛВ, примыкающая к ПП, может быть затенена или открыта для прямых солнечных лучей, 2) протяженность и положение затененной части линии визирования может варьироваться. Поскольку нижняя часть атмосферы является наиболее оптически плотной, эти факторы определяют особенности изменения яркости неба при прохождении облаком зоны 3. Рассмотрим результаты моделирования для зенитного угла Солнца $\xi_{Sun} = 70^\circ$ (рис. 2, б).

Если $\xi_{det} = 30^\circ$, то положение центра облака в момент, когда оно «сходит» с ЛВ, равно примерно 3,85 км; точка наблюдения и нижняя часть атмосферы затенены облаком. При дальнейшем удалении облака от точки A' наблюдаются меньшие, по сравнению с I_{clr} , значения яркости, что обусловлено затененностью отрезка ЛВ, примыкающего к поверхности. На расстоянии $R_{cld} > 20$ км ТН и ЛВ полностью открываются для прямых солнечных лу-

чей и влияние облака на яркость неба нивелируется ($I_{clr} \approx I_{cld}$).

При больших зенитных углах приемника ($\xi_{det} = 80^\circ$) характер изменения яркости неба в зависимости от R_{cld} становится более сложным. Когда облако «сходит» с ЛВ ($R_{cld} \approx -6,35$ км), примыкающая к ПП часть линии визирования, которая является наиболее яркой ввиду большого числа рассеивателей, освещена. Кроме того, точка наблюдения A' открыта для прямого солнечного излучения, что обуславливает дополнительный вклад в I_{cld} отраженного от подстилающей поверхности падающего излучения. Совместное воздействие этих факторов ведет к возрастанию яркости неба и появлению локального максимума (точка $P_2(80^\circ)$, рис. 2, б). При дальнейшем движении центра облака длина затененной части ЛВ остается одной и той же, но ее положение смещается ближе к ПП, затеняя нижнюю — самую яркую — часть атмосферы (в точке P_3 примыкающей к поверхности отрезок ЛВ затеняется максимально; соответствующее положение центра облака $R_{cld} \approx 0,5$ км). Следствием этого является уменьшение I_{cld} , и в точке P_3 наблюдается второй локальный минимум ($P_3(80^\circ)$, рис. 2, б). При дальнейшем движении облака закрытый отрезок ЛВ уменьшается (точка P_4), яркость I_{cld} постепенно возрастает и асимптотически приближается к яркости безоблачного неба.

Случай $\varphi_{Sun} = 180^\circ$ (Солнце располагается «за спиной» наблюдателя, рис. 2, в). Как и в случае $\varphi_{Sun} = 0$, существуют области пространства, в пределах которых облако не оказывает возмущающего воздействия на яркость неба по сравнению с безоблачной атмосферой (рис. 2, г). Однако в отличие от предыдущей геометрической схемы эксперимента, освещенная Солнцем часть облака является мощным отражателем (глубина проникновения фотонов в облако в среднем невелика). Помимо этого, вклад в регистрируемый сигнал вносит излучение, сформированное внутри облачного элемента.

При нахождении в зоне 2 облако пересекается линией визирования (точка P_1 на рис. 2, в). Обусловленное этой причиной увеличение I_{cld} относительно I_{clr} наблюдается при положении центра облака в интервалах примерно от $-6,15$ до $3,85$ км при $\xi_{det} = 30^\circ$ и от -40 до $-6,35$ км при $\xi_{det} = 80^\circ$. В этих областях яркость неба формируется под воздействием уже рассмотренных выше факторов — появления дополнительных рассеивателей и изменения длины оптического пути фотона в облаке. Конкурирующий характер этих факторов является причиной немоного характера яркости неба как функции R_{cld} (рис. 2, г).

Изменение яркости неба вне зоны 2 определяется положением тени облака на ЛВ. Рассмотрим две ситуации: $\xi_{Sun} < \xi_{det}$ и $\xi_{Sun} > \xi_{det}$ (рис. 2, в). Для условий $\xi_{Sun} = 30^\circ < \xi_{det} = 80^\circ$ затенение линии визирования облаком происходит, когда облако «сходит» с ЛВ в точке P_{22} (зона тени выделена на рис. 2, в). Для схемы эксперимента $\xi_{Sun} = 70^\circ > \xi_{det} = 30^\circ$ область тени формируется до «вступления» облака

в зону 2 (точка P_{21} на рис. 2, θ). В обоих случаях затенение ЛВ является причиной уменьшения яркости неба по отношению к безоблачному небу: $I_{cld} < I_{clr}$. Проявление дополнительной подсветки при заданных параметрах расчета было выражено достаточно слабо.

3. Мезомасштабные поля разорванной облачности

В разд. 2 мы исследовали изменение яркости безоблачного неба при появлении на небосводе изолированного облака. При переходе к облачным полям формирование радиационных характеристик при фиксированных значениях ξ_{det} , условиях освещенности и оптико-геометрических характеристиках облаков яркость неба I_{cld} зависит от конфигурации облачного поля. Изменчивость I_{cld} определяется присутствием/отсутствием облаков на линии визирования, ее затененностью облаками/открытостью направления «на Солнце», а также возможной под-

светкой ЛВ близлежащими облаками. Помимо этого, добавляются эффекты взаимного затенения облаков и их радиационного взаимодействия, когда часть выходящего через боковую поверхность облака излучения может многократно рассеиваться окружающими облаками.

Результаты совместного воздействия этих факторов обсуждаются ниже на примере отдельных облачных реализаций и фиксированного угла детектора $\xi_{det} = 60^\circ$. Площадь облачного поля полагалась равной 22500 км^2 , радиус соответствующей «окружности» на поверхности сферы составлял $\sim 84,5 \text{ км}$; центр облачного поля находился над точкой наблюдения (центр ЛСК). Будем анализировать ситуации, соответствующие условиям $0 \leq \varphi_{Sun} \leq 180^\circ$.

На рис. 3 представлены проекции четырех различных реализаций облачного поля на плоскость $X'O'Y'$ при баллах облачности $CF = 2$ и $CF = 5$. Реализации № 1 и 3 характеризуются отсутствием облаков на ЛВ (рис. 3, a и θ), тогда как в реализациях № 2 и 4 линия визирования пересекает облако (рис. 3, b и z).

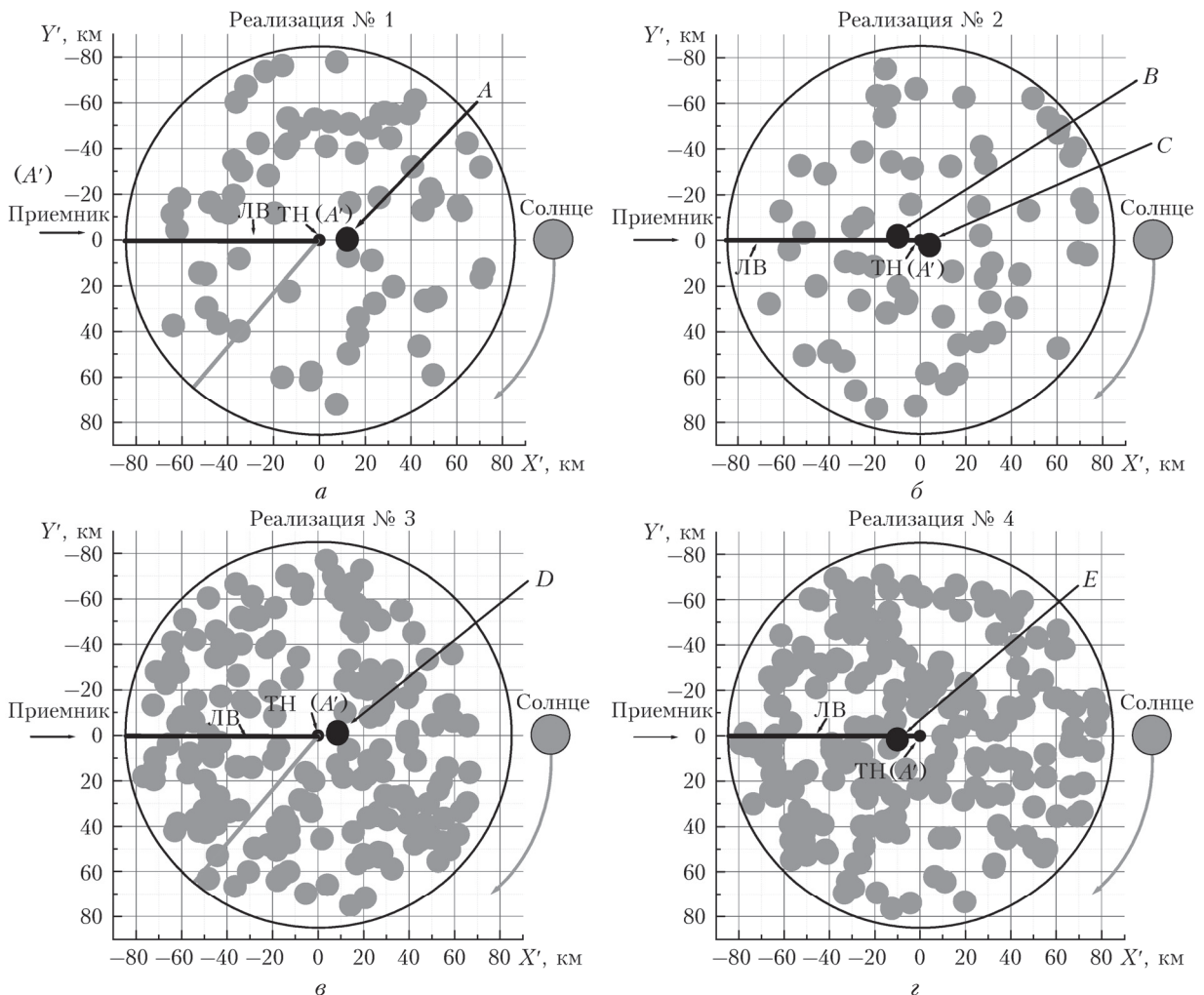


Рис. 3. Облачные реализации для двух баллов облачности CF : № 1 (a), № 2 (b) – $CF = 2$; № 3 (g), № 4 (z) – $CF = 5$. В реализациях № 1 и 3 линия визирования не пересекает облако; в реализациях № 2 и 4 линия визирования пересекает облако

Рассмотрим изменение яркости неба I_{cld} при изменении условий освещенности в реализациях № 1 и 3.

Пусть $\varphi_{Sun} = 0$ (рис. 4, а). При открытой ЛВ на формирование яркости неба могут повлиять 1) радиация, отраженная от расположенных вблизи ЛВ облаков и 2) эффект затенения ЛВ и точки наблюдения A' облаками, лежащими в направлении «на Солнце».

В реализации № 1 вблизи точки наблюдения расположено облако A ($R_{cld} \approx 12$ км, рис. 3, а). При $\xi_{Sun} < 55^\circ$ и указанных параметрах расчета облако A не затеняет линии визирования и ТН, следствием чего является соотношение $I_{clr} \approx I_{cld}$. В диапазоне углов $55^\circ < \xi_{Sun} < 82^\circ$ отрезок ЛВ и точка наблюдения затенены, и яркость неба уменьшается по сравнению с безоблачными условиями. Неравенство $I_{clr} \leq I_{cld}$ сохраняется и при дальнейшем увеличении ξ_{Sun} , когда ТН открывается для прямых солнечных лучей, но линия визирования по-прежнему остается частично затененной. (В этом случае реализуются механизмы, описанные в разд. 2: случай $\varphi_{Sun} = 0$, центр облака расположен между точками P_2 и P_3 .) Аналогичная ситуация наблюдается и в реализации № 3. Поскольку затеняющее ЛВ облако D расположено ближе к точке A' ($R_{cld} \approx 8,6$ км), эффект затенения проявляется уже при $\xi_{Sun} > 45^\circ$ (рис. 4, а).

Зависимость I_{cld} от азимута Солнца для обеих облачных реализаций представлена на рис. 4, б. Прежде всего отметим, что при $\xi_{Sun} = 60^\circ$ независимо от балла облачности яркость неба в присутствии облаков меньше яркости безоблачной атмосферы только в рассмотренном выше узком диапазоне $\varphi_{Sun} < 10^\circ$. При дальнейшем увеличении φ_{Sun} яркость разорванной облачности могла бы измениться из-за частичного затенения ЛВ облаками, лежащими в направлении «на Солнце». Однако в рассматриваемых реализациях эффект затенения подавляется дополнительной подсветкой линии визирования отраженной от облаков радиацией, и в области $\varphi_{Sun} > 50^\circ$ наблюдается увеличение яркости I_{cld} относительно яркости безоблачной атмосферы.

Зависимость яркости неба от конфигурации и количества облаков более существенно проявляется при увеличении зенитного угла Солнца ($\xi_{Sun} = 80^\circ$). Несмотря на то что линия визирования свободна от облаков, практически во всем диапазоне азимутальных углов Солнца для обеих реализаций выполняется соотношение $I_{cld} \leq I_{clr}$. Причиной уменьшения яркости неба является усиление эффектов затенения ЛВ (проявляется при малых баллах облачности, реализация № 1) и взаимного затенения облаков (усиливается при возрастании балла облачности, реализация № 3). Яркость неба в облачном поле близка к яркости безоблачной атмосферы (и может даже превышать ее за счет подсвечивания близлежащими облаками) только для тех направлений прямых солнечных лучей, на пути распространения которых облака отсутствуют. Так, в реализации № 1 $I_{cld} \approx I_{clr}$ в диапазонах $60^\circ < \xi_{Sun} < 100^\circ$ и $130^\circ < \xi_{Sun} < 180^\circ$, но $I_{cld} < I_{clr}$ при $\varphi_{Sun} \approx 120^\circ$.

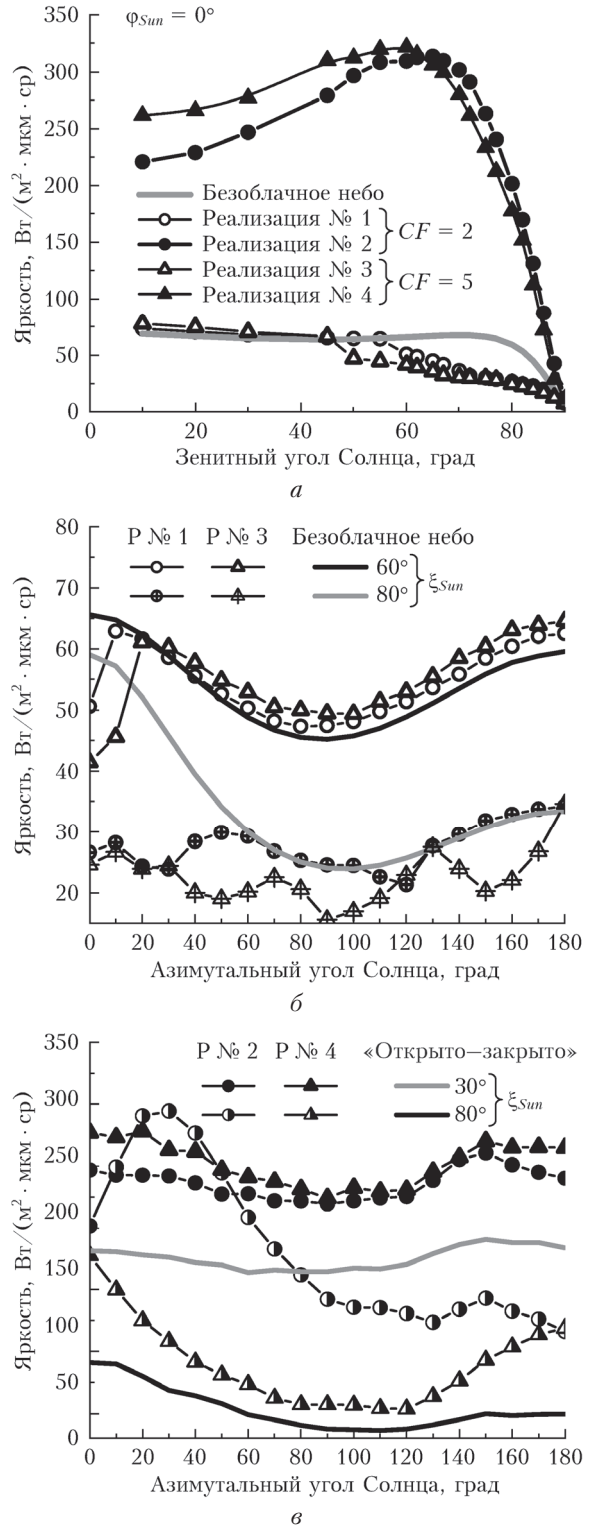


Рис. 4. Зависимость яркости неба в различных облачных реализациях от зенитного (а) и азимутального (б, в) углов Солнца. Расчеты в приближении «открыто-закрыто» выполнены для балла облачности $CF = 5$ (в)

Вероятность затенения линии визирования и точки наблюдения облаками увеличивается с ростом балла облачности. Из рис. 3, в следует, что в реализации № 3 только в пределах узкой зоны вблизи

$\varphi_{Sun} \approx 130^\circ$ и $\varphi_{Sun} \approx 180^\circ$ облака располагаются настолько далеко от ТН, что их присутствие не приводит к изменению яркости неба относительно яркости безоблачной атмосферы. Для всех остальных значений φ_{Sun} имеет место неравенство $I_{cld} < I_{clr}$.

Рассмотрим реализации № 2 и 4. В этих реализациях яркость неба определяется присутствием на ЛВ облаков B и E . Линия визирования пересекает верхушки облаков, что потенциально обеспечивает «всплеск» яркости за счет появления дополнительных рассеивателей в виде облачных капель и сравнительно небольшого ослабления излучения от входа в облако до отрезка ЛВ с освещенной стороны.

Зависимость яркости неба от зенитного угла Солнца обсудим на примере ситуации $\varphi_{Sun} = 0$ (рис. 4, a).

В реализации № 2 облако C ввиду своей близости к точке наблюдения обеспечивает дополнительную подсветку ЛВ и облака B . Вместе с тем оно частично затеняет линию визирования и перекрывает доступ прямых солнечных лучей к ТН до $\sim \xi_{Sun} = 80^\circ$ (при $\xi_{Sun} > 80^\circ$ ТН открывается для нерассеянного излучения). Однако, судя по результатам моделирования, эффект затенения не влияет столь существенно на изменение яркости неба при появлении других облаков и $I_{cld} \geq I_{clr}$ при всех ξ_{Sun} .

Сравнение реализаций показывает, что в отличие от облака B (реализация № 2), облако E (реализация № 4) окружено плотным кольцом облаков. Следствием этого является усиление воздействия двух противоположных эффектов: с одной стороны, переотражения излучения между облачными элементами и освещение ЛВ отраженной от них радиацией, а с другой стороны, взаимного затенения облаков и линии визирования. При $\xi_{Sun} < 60-65^\circ$ яркость в реализации № 4 превышает яркость в реализации № 2, причем это соотношение остается справедливым для всех азимутальных углов Солнца (рис. 4, b). Возможно, что такое соотношение яркостей связано с более сильным проявлением радиационного взаимодействия облаков при переходе от малооблачной ситуации ($CF = 2$) к реализации со средним баллом облачности ($CF = 5$).

При дальнейшем увеличении зенитного угла Солнца соотношение между яркостями меняется (рис. 4, a, b) и яркость в реализации № 2 становится больше, чем в реализации № 4. Эти результаты подтверждают доминирующую роль эффектов затенения при больших наклонных углах ξ_{Sun} . Отметим также, что яркость неба при изменении азимутального угла Солнца в большей степени зависит от конфигурации облаков в малооблачной ситуации нежели в реализации со средним баллом облачности (см. яркости неба при $\xi_{Sun} = 80^\circ$ на рис. 4, z).

На рис. 4, b представлены значения уходящего с верхней границы излучения, рассчитанные с использованием приближения «открыто–закрыто»:

$$I_{cld}^{o-c} = (1 - 0,1 \cdot CF) \cdot I_{clr} + 0,1 \cdot CF \cdot I_{cld}^{(CF=10)}, \quad (2)$$

где $I_{cld}^{(CF=10)}$ — яркость уходящего излучения в присутствии сплошного горизонтально-однородного

слоя облачности. Приближение «открыто–закрыто» успешно работает при рассмотрении слоистообразных облаков, горизонтальные размеры которых существенно превосходят вертикальные (параметр $\gamma = H_{cld}/2R_x \ll 1$), однако его применение для описания радиационных характеристик в облаках с $\gamma \sim 1$ может привести к серьезным ошибкам (см., например, [19]). Результаты моделирования показывают, что использование приближения (2) для расчета в конкретных облачных реализациях приводит как к существенному занижению, так и завышению яркости неба относительно значений, вычисленных с учетом 3D-эффектов облаков (I_{cld}^{3D}). Например, при $\xi_{Sun} = 80^\circ$ и $CF = 5$ для реализации № 4 имеет место соотношение $I_{cld}^{3D} \geq I_{cld}^{o-c}$, тогда как в реализации № 3 справедливо обратное неравенство $I_{cld}^{3D} < I_{cld}^{o-c}$.

Заключение

На основе численного моделирования выявлены основные закономерности формирования пространственно-угловых характеристик яркости неба в присутствии изолированного облака и полей облаков вертикального развития при наблюдениях из космоса. Использование сферической модели атмосферы позволяет оценить влияние пространственной неоднородности детерминированной облачной реализации на радиационные характеристики атмосферы при больших зенитных углах наблюдения и Солнца (более 80°).

Формирование яркости неба при появлении на небе изолированного облака определяется его присутствием/отсутствием на линии визирования, затененностью ЛВ облаками/открытостью направления «на Солнце», а также подсветкой ЛВ отраженной от облака радиацией. Если линия визирования пересекает облако, яркость неба может существенно превысить яркость безоблачной атмосферы, особенно при условии, что точка входа ЛВ в облако освещается Солнцем. Уменьшение яркости неба связано с эффектами затенения облаком линии визирования и точки наблюдения на поверхности Земли. Зона влияния облака можеткратно превышать его горизонтальные размеры и существенно возрастает с ростом зенитных углов Солнца и детектора.

Для имитации облачных полей использована модель пуассоновских потоков точек в пространстве, равномерно распределенных на поверхности сферы. Рассмотрены четыре различные реализации облаков для малых и средних баллов облачности. Учитывая случайный характер распределения облачных элементов (что свойственно реальной атмосфере), значение яркости для заданных условий освещенности и наблюдения меняется от одной реализации к другой и, в зависимости от конфигурации облаков, может быть как выше, так и ниже яркости безоблачной атмосферы. В облачных полях к перечисленным выше 3D-эффектам изолированного облака добавляется влияние радиационного взаимодействия — взаимное затенение и эффекты многократного рассеяния между облаками. Представленные в данной статье результаты показывают, что особенности

поля яркости разорванной облачности определяют в основном локализацией облаков относительно двух направлений – визирования и направления «на Солнце». В этом смысле для некоторых геометрических схем зондирования различие яркостей неба в реализациях с разным баллом облачности может быть меньше по сравнению с диапазоном изменения отраженной радиации в пределах одной и той же реализации. Влияние конфигурации облаков на угловые характеристики поля яркости более значительно проявляется в малооблачных ситуациях, поскольку с ростом количества облаков равномерный характер их распределения сглаживает эффекты, характерные для изолированных облаков.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-01-00617-а) и Минобрнауки РФ (Т.В. Русскова, грант Президента РФ № МК-5381.2016.5).

1. *Varnai T., Marshak A.* Observations of three-dimensional radiative effects that influence MODIS cloud optical thickness retrievals // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59, N 9. P. 1607–1618.
2. *Iwabuchi H., Hayasaka T.* A multi-spectral non-local method for retrieval of boundary layer cloud properties from optical remote sensing data // *Remote Sens. Environ.* 2003. V. 88, N 3. P. 294–308.
3. *Horvath A., Davies R.* Anisotropy of water cloud reflectance: A comparison of measurements and 1D theory // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 1. L01102. DOI: 10.1029/2003GL018386.
4. *Marshak A., Platnick S., Varnai T., Wen G., Cahalan R.F.* Impact of 3D radiative effects on satellite retrievals of cloud droplet sizes // *J. Geophys. Res. D.* 2006. V. 111, N 9. DO9207. DOI: 10.1029/2005JD006686.
5. *Kassianov E.I., Ovchinnikov M., Berg L.K., McFarlane S.A., Flynn C.J., Ferrare R., Hostetler C., Alexandrov M.* Retrieval of aerosol optical depth in vicinity of broken clouds from reflectance ratios: Case study // *Atmos. Measur. Technol.* 2010. V. 3. P. 1333–1349.
6. *Wen G., Marshak A., Levy R., Remer L., Loeb N., Varnai T., Cahalan R.* Implementation of the correction algorithm of the MODIS aerosol retrievals near clouds // *J. Geophys. Res. D.* 2013. V. 118, N 16. P. 9168–9181.
7. *Marshak A., Evans K.V., Varnai T., Wen G.* Extending 3D near-cloud corrections from shorter to longer wavelengths // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2014. V. 147. P. 79–85.
8. *Koren I., Remer L.A., Kaufman Y.J., Rudich Y., Martins J.V.* On the twilight zone between clouds and aerosols // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, N 8. L08805. DOI: 10.1029/2007GL029253.
9. *Varnai T., Marshak A.* MODIS observations of enhanced clear sky reflectance near clouds // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N 6. L06807. DOI: 10.1029/2008GL037089.
10. *Chiu J.C., Marshak A., Knyazikhin Y., Pilewskie P., Wiscombe W.* Physical interpretation of the spectral radiative signature in the transition zone between cloud-free and cloudy regions // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 1419–1430.
11. *Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Arola A., Ferrare R.A., Hostetler C.A., Crumeyrolle S.N., Berkoff T.A., Welton E.J., Lolli S., Lyapustin A., Wang Y., Schafer J.S., Giles D.M., Anderson B.E., Thornhill K.L., Minnis P., Pickering K.E., Loughner C.P., Smirnov A., Sinyuk A.* Observations of rapid aerosol optical depth enhancements in the vicinity of polluted cumulus clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 21. P. 11633–11656.
12. *Bar-Or R.Z., Koren I., Altaratz O., Fredj E.* Radiative properties of humidified aerosols in cloudy environment // *Atmos. Res.* 2012. V. 118. P. 280–294.
13. *Wen G., Marshak A., Cahalan R.F., Remer L.A., Kleidman R.G.* 3D aerosol-cloud radiative interaction observed in collocated MODIS and ASTER images of cumulus cloud fields // *J. Geophys. Res. D.* 2007. V. 112, N 13. D13204. DOI: 10.1029/2006JD008267.
14. *Wen G., Marshak A., Cahalan R.F.* Impact of 3D clouds on clear sky reflectance and aerosol retrieval in a biomass burning region of Brazil // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2006. V. 3. P. 169–172.
15. *Cahalan R.F., Oreopoulos L., Wen G., Marshak A., Tsay S.C., DeFelice T.P.* Cloud characterization and clear sky correction from Landsat-7 // *Remote Sens. Environ.* 2001. V. 78. P. 83–98.
16. *Kobayashi T., Masuda K., Sasaki M., Mueller J.* Monte Carlo simulations of enhanced visible radiance in clear-air satellite fields of view near clouds // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 21. P. 26569–26576. DOI: 10.1029/2000JD900453.
17. *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 3D transport code RADUGA // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2005. V. 94. P. 405–424.
18. *Тарасенков М.А., Курнос И.В., Белов В.В.* Оценка влияния облачности на наблюдение Земли из космоса через просвет в облачном поле // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 9. С. 767–771.
19. *Зуев В.Е., Тумов Г.А.* Оптика атмосферы и климат. Томск: Спектр, 1996. 271 с.
20. *Копытов Н.П., Митюшов Е.А.* Универсальный алгоритм равномерного распределения точек на произвольных аналитических поверхностях в трехмерном пространстве // *Фундаментальные исследования.* 2013. № 4. С. 618–622.
21. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I: Детерминированная атмосфера // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 2. С. 99–114.
22. *Журавлева Т.Б., Бедарева Т.В., Кабанов М.В., Насртдинов И.М., Сакерин С.М.* Особенности угловых характеристик диффузной солнечной радиации в малооблачной атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 8. С. 777–786; *Zhuravleva T.B., Bedareva T.V., Kabanov M.V., Nasrtidinov I.M., Sakerin S.M.* Specific features of angular characteristics of diffuse solar radiation in a little-cloud atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 6. P. 607–616.
23. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралшев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
24. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79, N 5. P. 831–844.
25. *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, Geophysics Directorate. Hanscom AFB, MA 01731-3010.* 1996. 260 p.

26. *Hook S.J.* ASTER Spectral Library: Johns Hopkins University (JHU) spectral library; Jet Propulsion Laboratory (JPL) spectral library; The United States Geologi-

cal Survey (USGS-Reston) spectral library. 1998. Dedicated CD-ROM. Version 1.2 (см. также <http://speclib.jpl.nasa.gov>).

T.B. Zhuravleva, I.M. Nasrtdinov, T.V. Russkova. **Influence of cloud 3D effects on the spatio-angular characteristics of reflected solar radiation.**

Numerical simulation of the spatio-angular characteristics of reflected solar radiation in broken clouds is performed in the spherical model of the atmosphere using statistical algorithms developed at IAO SB RAS. The regularities of the formation of brightness fields caused by the finite cloud size, their mutual shading and radiation reflection by neighboring clouds in selected cloud realizations are considered. The spatio-angular features of brightness fields in the realizations with small and medium cloud fraction mainly depend on the location of clouds relative to the viewing direction and direction «to the Sun».