

Такахиза Кобаяши, Казухико Масуда, Акихиро Уичияма

О ВОЗРАСТАНИИ ЯРКОСТИ НЕБА В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ С ПОМОЩЬЮ СЦТО ВБЛИЗИ ОБЛАКОВ

Институт метеорологических исследований 1-1, Нагамине, Цукуба, Ибараки, Япония

Поступила в редакцию 7.12.98 г.

Принята к печати 18.01.99 г.

В измерениях с помощью СЦТО обнаружена повышенная яркость ясного неба в видимом диапазоне при наличии вблизи поля зрения СЦТО разорванной облачности. Так как заметного изменения яркостной температуры отмечено не было, то причиной повышения яркости считается влияние облаков, находящихся вблизи поля зрения (ПЗ). Если вблизи ПЗ имеется разорванная облачность, то солнечная радиация, отраженная от освещенной Солнцем стороны облака, попадает в ПЗ и тем самым может увеличить измеряемую яркость. Яркость (длина волны 0,412 мкм) вблизи облака превысила яркость на расстоянии 10 км от него примерно на 5%. Повышенные значения яркости, измеренной с помощью СЦТО, почти совпадают с результатами расчетов по методу Монте-Карло.

1. Введение

Сканер цвета и температуры океана (СЦТО) [1] – это один из 8 датчиков, установленных на улучшенном спутнике для наблюдений Земли (УСНЗ), который был запущен в августе 1996 г. Конструктивно СЦТО аналогичен сканеру цвета прибрежной зоны (СЦПЗ) и обладает достаточной чувствительностью для оценки продуктивности океана и температуры морской поверхности. К сожалению, измерения на УСНЗ были прекращены летом 1997 г., однако к тому времени уже был собран значительный объем полезных данных.

При использовании спутниковой аппаратуры для исследования свойств подстилающей поверхности необходимо вводить точные поправки для учета вклада рассеяния в атмосфере. Одним из важных моментов улучшения алгоритма атмосферной коррекции является учет многократного рассеяния и влияния горизонтальной неоднородности подстилающей поверхности и атмосферы. При наличии ярких участков поверхности по соседству с темным исследуемым пикселем, например в прибрежной зоне, более высокое отражение от участков суши повышает яркость, фиксируемую спутниковым датчиком, что приводит к смещению восстанавливаемого значения отражательной способности поверхности, известному как эффект бокового подсвета.

Аналогичным образом горизонтально неоднородная атмосфера, которая, как правило, наблюдается в условиях облачности, влияет на сигналы, регистрируемые спутниковым датчиком. Даже если ПЗ однородно и в нем нет облаков, разорванная облачность вблизи ПЗ влияет на рассеяние в атмосфере посредством радиационных взаимодействий внутри и вне ПЗ. Часть излучения от Солнца, атмосферы и земной поверхности рассеивается облачностью и попадает в поле зрения спутника, в результате чего повышается яркость, регистрируемая спутниковым датчиком. Следствием этого добавочного излучения является то, что отражательная способность поверхности и характеристики атмосферы восстанавливаются с систематической ошибкой при использовании для атмосферной коррекции одномерных моделей переноса излучения, что, как правило, происходит на практике [4]. Здесь будем называть по-

добную облачность смежной, а ее влияние – эффектом бокового подсвета от облаков.

Целью данной работы является исследование влияния смежной облачности на основе измерительных данных СЦТО. Отметим, что основное внимание обращено на повышение яркости, тогда как эффекты затенения и экранирования облаками не учитываются.

2. Измерения с помощью СЦТО

Для системы «поверхность–атмосфера» яркость L , фиксируемая космическим датчиком, записывается как

$$L = L_{pa} + L_r + L_n,$$

где L_{pa} представляет собой вклад, обусловленный радиацией, рассеянной в атмосфере без отражения от поверхности, и называемый яркостью атмосферной трассы [2]; L_r – вклад, обусловленный отражением от поверхности; L_n – член, учитывающий взаимодействие атмосферы и поверхности. При восстановлении характеристик поверхности по измерениям из космоса необходимо исключить из измеряемой яркости вклад, обусловленный рассеянием в атмосфере. Если в окрестности поля зрения, считающегося безоблачным, находится облако, то часть рассеянных им фотонов поступает в ПЗ и увеличивает яркость трассы. Считается, что такое повышение яркости имеет место в областях, очень близких к облакам. Поэтому для исследования эффекта бокового подсвета от облаков требуется аппаратура, обеспечивающая высокое пространственное разрешение в измерениях.

СЦТО имеет превосходное пространственное разрешение (700 м в надир) и потому может быть использован для исследования эффекта бокового подсвета от облаков. С его помощью можно зафиксировать повышение яркости вблизи облака. Однако повышение яркости имеет место не только вследствие эффекта бокового подсвета от облаков, но также в случаях оптически более плотной атмосферы, например при наличии оптически тонкой облачности вблизи ПЗ. Необходимо уметь отличать этот эффект от эффекта бокового подсвета от облаков. Весьма полезными для этого являются имеющиеся на УСНЗ три инфракрасных кана-

ла вдобавок к датчику видимого диапазона. При измерениях над теплой поверхностью океана облачные пиксели будут иметь гораздо более низкую яркостную температуру и поэтому будут легко отличимы от безоблачных областей. Кроме того, в ИК-области эффект бокового подсвета от облаков не проявляется, поэтому по данным из инфракрасных измерений можем идентифицировать эффект бокового подсвета от облаков.

На рис. 1 представлено изображение, полученное с помощью СЦТО на длине волны 0,412 мкм над северо-восточной частью Тихого океана вблизи Японии 26 апреля 1997 г. Белые области соответствуют облачности. Правая сторона облака в центре изображения на рис. 1 освещена Солнцем. Зенитный угол Солнца составляет приблизительно 23°, а азимутальный угол, отсчитываемый от направления на север, приблизительно равен 143°. Однородные безоблачные области расположены справа от облака, тогда как слева от него имеются оптически тонкие облака.

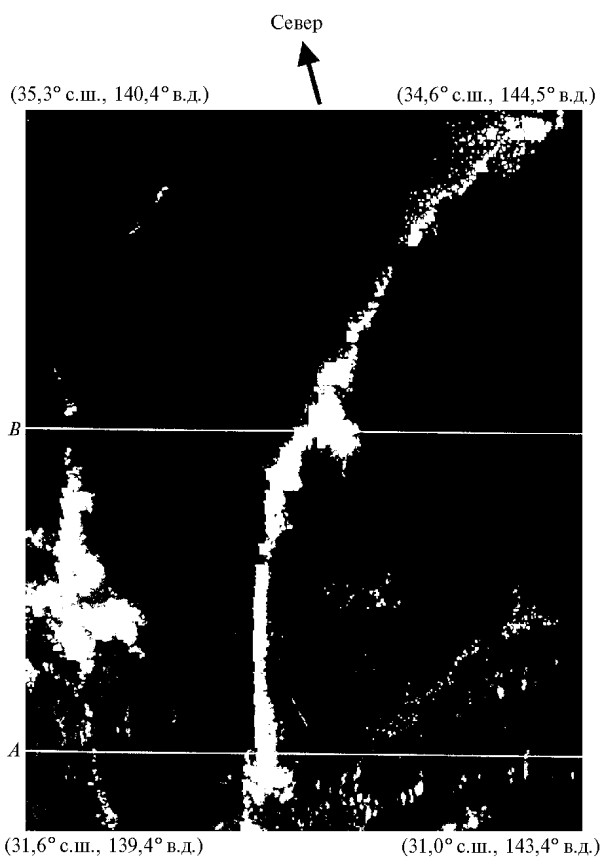


Рис. 1. Изображение, полученное в измерениях с помощью СЦТО над северо-восточной частью Тихого океана в апреле 1997 г.

На рис. 2 показаны разрез измеренной отражательной способности вдоль линии *A* с правой стороны от облака, изображенного на рис. 1, на трех длинах волн видимого диапазона 0,412; 0,490 и 0,565 мкм, а также яркостная температура из измерений на длине волны 12,0 мкм. Размер пикселя для датчика СЦТО составляет приблизительно 700 м. Область повышенного альбедо в видимом диапазоне и низкой яркостной температуры соответствует облаку. Вертикальная штрихпунктирная линия указывает границу между облаком и безоблачной областью. На расстоянии приблизительно 10 км от границы безоблачной области

(пиксели с номером выше 255) значения характеристик становятся практически постоянными (низкая яркость в видимом диапазоне и высокая яркостная температура), что указывает на отсутствие облачности и горизонтальную однородность атмосферы в этой области. Яркость и яркостная температура безоблачной атмосферы показаны пунктирными линиями. В безоблачной области в непосредственной близости к ее границе с облаком наблюдается небольшое увеличение яркости видимой радиации. В то же время несколько уменьшается яркостная температура, из чего можно сделать вывод, что в этой области имеется оптически тонкое облако либо оптически плотный аэрозоль. Более вероятно, что скачок яркости в видимом диапазоне обусловлен присутствием оптически тонкого облака, так как это увеличение слабо зависит от длины волны.

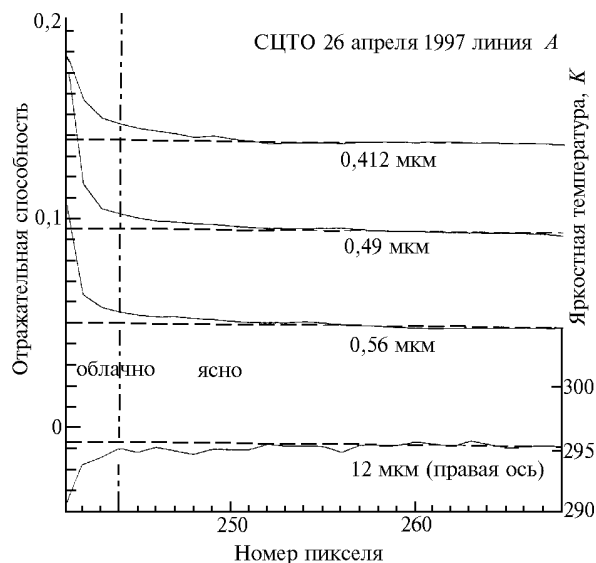


Рис. 2. Разрез поля яркости, измеренной с помощью СЦТО вдоль линии *A*, указанной на рис. 1

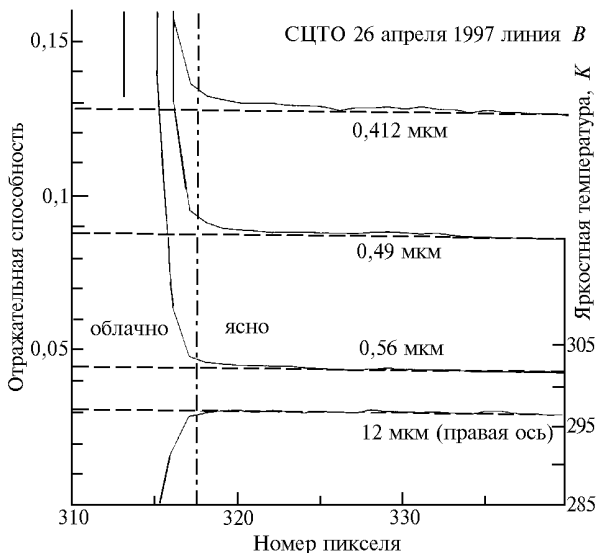


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но вдоль линии *B*, указанной на рис. 1

Рис. 3 отличается от рис. 2 лишь тем, что соответствует линии *B* с правой стороны от облака, показанного на

рис. 1. Резкое увеличение (уменьшение) яркости в видимом диапазоне (яркостной температуры) указывает на то, что облако имеет отчетливую границу. Значения яркости в видимой области и яркостной температуры практически постоянны на расстоянии порядка 10 км от границы безоблачной области (пиксели с номером выше 330), а в безоблачной области в непосредственной близости от границы наблюдается небольшой рост яркости в видимом диапазоне, как и на рис. 2. Однако отсутствие в этой области заметных изменений яркостной температуры позволяет предположить, что в данном случае вблизи границы нет ни облачности, ни плотного аэрозоля. На длине волны 0,412 мкм значение яркости вблизи границы облачности превышает, приблизительно на 5%, ее значения в областях, удаленных примерно на 10 км от этой границы.

Однако 5%-е увеличение яркости в видимой области спектра может быть вызвано и некоторым увеличением концентрации аэрозоля. Согласно оценкам, рэлеевская и аэрозольная оптические толщины в безоблачной области на длине волны 0,49 мкм составляют величины порядка 0,15 и 0,2 соответственно. Яркость безоблачной области в отраженном свете приблизительно линейно связана с оптической толщиной, поэтому небольшое, всего на 0,018, увеличение аэрозольной оптической толщины ведет к росту яркости в видимой области на 5% и никак не может повлиять на яркостную температуру. Следовательно, в этой ситуации трудно отличить действие эффекта бокового подсвета облаками от аэрозольного эффекта. Однако, как показано в следующей части, спад роста измеряемой яркости с расстоянием от границы хорошо моделируется теоретически. Поэтому увеличение яркости (рис. 3) в видимой области спектра, наблюдаемое вблизи границы, обусловлено эффектом бокового подсвета облаками. В следующей части проведен анализ измерений с помощью СЦТО путем сравнения их с результатами моделирования по методу Монте-Карло.

3. Моделирование по методу Монте-Карло

Для анализа повышенных значений яркости, измеренных с помощью СЦТО, было выполнено моделирование по методу Монте-Карло. Используемый нами алгоритм Монте-Карло аналогичен описываемому Кобаяши [3]. Траектории фотонов рассчитываются обычным образом. Расстояние, проходимое фотоном до взаимодействия с частицей, и угол рассеяния определяются объемным коэффициентом рассеяния и индикатрисой рассеяния. Однако для сокращения времени расчетов измеряемая приемником яркость рассчитывается с учетом результатов [5].

Для моделирования полосовидного облака, изображенного на рис. 1, его геометрическая форма задавалась в виде бесконечно длинного бруса с квадратным сечением. Высота верхней границы облачности принималась равной 4 км, исходя из оценок, основанных на том, что измеренная яркостная температура верхней границы облачности составляет 2 °С, а температура поверхности океана 25 °С. В отсутствие информации о высоте нижней границы она принимается равной 2 км. Ширина облака – 2 км, коэффициент ослабления в облаке 5 км⁻¹. Индикатриса рассеяния рассчитывалась в предположении логнормального распределения капель по размерам в жидкокапельном облаке. Дисперсия распределения облачных капель по размеру равнялась 1,41 мкм, а медианный радиус – 2,94 мкм. Действительная часть показателя преломления для облачных капель составляла 1,335. Вертикальные профили плотности молекулярных составляющих и аэрозольных частиц

соответствуют модели МакКлатчи [6] для лета умеренных широт. Распределение по размерам аэрозольных частиц также предполагалось логнормальным (модель океанического аэрозоля [7]) с дисперсией 2,51 мкм и медианным радиусом 0,30 мкм.

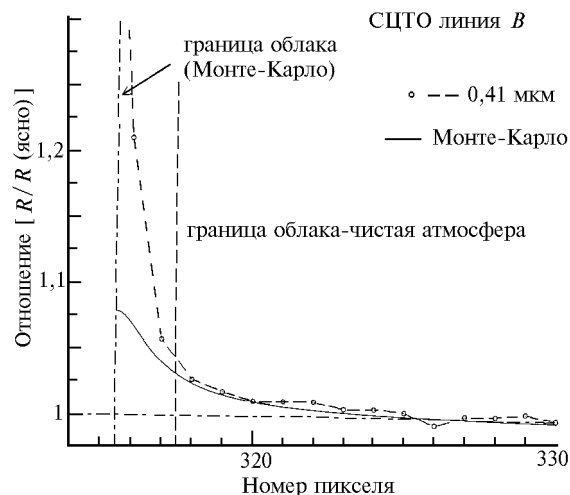


Рис. 4. Сравнение расчетов по методу Монте-Карло с измерениями СЦТО на длине волны 0,412 мкм. Сравнимые величины нормированы на значение интенсивности в 10 км от границы безоблачной области

Датчик ориентировался в надир, при этом его пространственное разрешение равнялось 2 × 2 км; зенитный угол Солнца – 25°, а азимутальный – 135° относительно направления на север. Количество реализаций в расчетах составило 30 000 000.

На рис. 4 приведены результаты расчетов по методу Монте-Карло и данные измерений с помощью СЦТО, выполненных вдоль линии В (см. рис. 1). Значения яркости на длине волны 0,412 мкм нормированы на значение таковой в безоблачной области на расстоянии 10 км от границы раздела «облако–чистая атмосфера». В расчетах по методу Монте-Карло предполагалось, что граница облака совпадает с пикселем номер 315,5, где наблюдается значительное увеличение яркости. Расчеты по методу Монте-Карло и измерения СЦТО практически совпадают в безоблачной области вблизи границы. Необходимо отметить, что входные параметры в расчетах по методу Монте-Карло могут отличаться от условий измерений, например нулевое значение альбедо поверхности. Это отличие может являться причиной неубывающего хода отношения с расстоянием.

4. Обсуждение результатов и выводы

В измерениях с помощью СЦТО обнаружена повышенная яркость ясного неба в видимом диапазоне при наличии вблизи поля зрения СЦТО разорванной облачности. Если вблизи ПЗ имеется разорванная облачность, то солнечная радиация, отраженная от освещенной Солнцем стороны облака, попадает в ПЗ и тем самым может увеличивать измеряемую яркость. Однако причиной увеличения значений яркости могут также быть ошибки измерений и влияние оптически тонкой облачности.

Так как космический прибор обладает некоторой инерционностью, то при сканировании от яркой области в облаке к темной вне облака на измеренную яркость темной области будет оказывать влияние остаточная засветка.

Усиление яркости вследствие такой ошибки измерений должно слабо зависеть от длины волны. Однако рост излучения на длине волны 0,565 мкм намного слабее, чем на длине волны 0,412 мкм (см. рис. 3). Это указывает на то, что измеренное увеличение яркости не было результатом ошибок измерений. В то же время оптически тонкая облачность, в той или иной степени, должна влиять на яркость в ИК-диапазоне (см. рис. 2). Однако на рис. 3 не видно сколько-нибудь заметных изменений яркостной температуры. На этом основании можно сделать вывод, что рост яркости, показанный на рис. 3, обусловлен эффектом бокового подсвета от облаков.

На длине волны 0,412 мкм яркость ясного неба вблизи облачности увеличилась приблизительно на 5% по сравнению с ее значением, полученным при измерениях на расстоянии 10 км от облака. Повышенные значения яркости, измеренной с помощью СЦТО, хорошо совпадают с результатами моделирования по методу Монте-Карло. Пока еще нельзя отрицать вероятность того, что повышенное содержание аэрозоля вблизи облаков может влиять на повышение яркости, однако этот эффект трудно идентифи-

цировать. Поляризационные измерения, также проведенные с борта УСНЗ (POLDER: Поляризация и направленность отражательной способности Земли), могут быть полезными при попытках различить эффект бокового подсвета от облаков и аэрозольный эффект.

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны Японского национального управления по освоению космоса.

1. Kawamura H. и группа СЦТО // J. Oceanogr. V. 54. P. 383–399.
2. De Haan J.F., Hovenier J.W., Kokke J.M.M., van Stokkom H.T.C. // Remote Sens. Environ. 1991. V. 37. P. 1–27.
3. Kobayashi T. // J. Atmos. Sci. 1988. V. 45. P. 3034–3045.
4. Kobayashi T., Masuda K., Sasaki M. Enhanced visible radiance in clear-air fields of view adjacent to clouds: Monte Carlo simulations (Готовится к печати).
5. Kunkel K.E., Weinman J.A. // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. P. 1772–1781.
6. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Volz F.E., Garing J.S. // Optical properties of the atmosphere. 1972. AFCLR-72-0497.
7. Shettle E.P., Fenn R.W. // Models of the atmospheric aerosols and their optical properties. 1976. AFGARD-CP-183.

Takahisa Kobayashi, Kazuhiko Masuda, Akihiro Uchiyama. **Enhanced Visible Radiance near Clouds in the OCTS Measurements.**

Enhance visible radiance was found in clear-air fields of view near a broken cloud, in the OCTS measurements. No meaningful change in the corresponding brightness temperature was observed, so the enhanced radiance is thought to be due to the effects of clouds near the fields of view (FOV). If a broken cloud exists in the vicinity of the FOV, the solar radiation reflected from the solar side of the cloud enters the FOV and may enhance the measured radiance. An increase of about 5% in the radiance clouds was measured by comparing it with the radiance in a region 10 km from the cloud at a wavelength of 0.412 μm . The enhanced radiance measured by the OCTS sensor almost coincides with the Monte-Carlo simulation.