

Физические причины появления атмосферных бликов на спутниковых ИК-изображениях

С.В. Афонин^{1,2}, В.В. Белов^{1,2}

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

²*Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: afonin@iao.ru, belov@iao.ru*

В работе на основе результатов численного моделирования и реальных спутниковых данных проведен анализ связи атмосферного рассеяния с появлением солнечных бликов на спутниковых ИК-изображениях, получаемых в каналах спектрального диапазона 3.5-4 мкм для метеоусловий замутненной атмосферы. Рассмотрены физические причины и оптико-геометрические условия проявления этого эффекта при дистанционном мониторинге Земли из космоса.

Ключевые слова: ИК-диапазон, спутниковые изображения, атмосферные блики, причины возникновения.

Введение

Одним из физических явлений, снижающих эффективность применения пассивных спутниковых методов для решения задач зондирования атмосферы и земной поверхности, являются солнечные блики, возникающие на водных поверхностях, на аэрозольных и облачных образованиях в атмосфере. Фильтрация солнечных бликов на спутниковых снимках стала обычной процедурой, например, при спутниковых измерениях аэрозольных характеристик, влагосодержания атмосферы, при детектировании очагов горения.

Для целей фильтрации ложных тревог при обработке спутниковых данных используются простые пороговые тесты с использованием углов наблюдений и спутниковых измерений в различных спектральных каналах. Однако авторы этих тестов [1] признают, что они не гарантируют их высокую эффективность. Особенно это касается случая бликов на краях облаков, когда их можно принять за реальные пожары, тепловое излучение которых проходит через полупрозрачную облачность. Важность указанных проблем наглядно отражена в работах [2,3]. Согласно этим данным по результатам обработки данных спутниковой системы TRMM/VISR в 1998-2001 годах в Сахеле (Африка) был получен аномальный пик пожарной активности в весенний период, что противоречило данным наземных наблюдений и других спутниковых систем. Причиной этой аномалии оказались солнечные блики от водоемов и на краях облаков, которые не были идентифицированы при детектировании пожаров.

Сложившаяся ситуация требует разработки более надежных и физически обоснованных алгоритмов идентификации и фильтрации атмосферных бликов в спектральной области 3.5-4 мкм. Для этого необходим анализ физических причин и оптико-геометрических условий их возникновения.

1. Низкая угловая высота Солнца

На первом этапе исследований рассмотрим возможность проявления солнечных бликов от аэрозоля или облачности с малой оптической толщиной на спутниковых снимках при низких высотах Солнца. С этой целью нами были выполнены численные расчеты с помощью программы MODTRAN_v3.5, имитирующие измерения сканера AVHRR в спектральном канале $\lambda=3.75$ мкм. На их основе было изучено влияние рассеянного аэрозолем солнечного излучения на измеряемую радиационную температуру в зависимости от условий спутниковых наблюдений. Расчеты проводились для следующих оптико-геометрических параметров:

- метеорологическая модель – лето средних широт;
- модели приземного аэрозоля – континентальный (rural) и городской (urban), альbedo однократного рассеяния аэрозоля ω_A порядка 0.92 и 0.51, соответственно;
- дальность видимости S_M от 50 до 1 км;
- геометрические параметры наблюдений – угол сканирования $\Theta_V=0\div55^\circ$, угловая высота Солнца H_S от 75° до 0° , относительный азимут наблюдений φ от 0° до 180° .

Анализ результатов моделирования показал весьма сложный характер поведения величины интенсивности рассеянного атмосферой солнечного излучения в зависимости от условий спутниковых наблюдений. Представленные на рис. 1 расчетные данные для модели континентального аэрозоля ($S_M=5$ км) иллюстрируют этот факт. Для удобства интенсивность рассеянного атмосферой солнечного излучения I_{SCT} выражена на этом рисунке как добавка ΔT_{SCT} к радиационной температуре $T_{3.7}$ в канале $\lambda=3.7$ мкм.

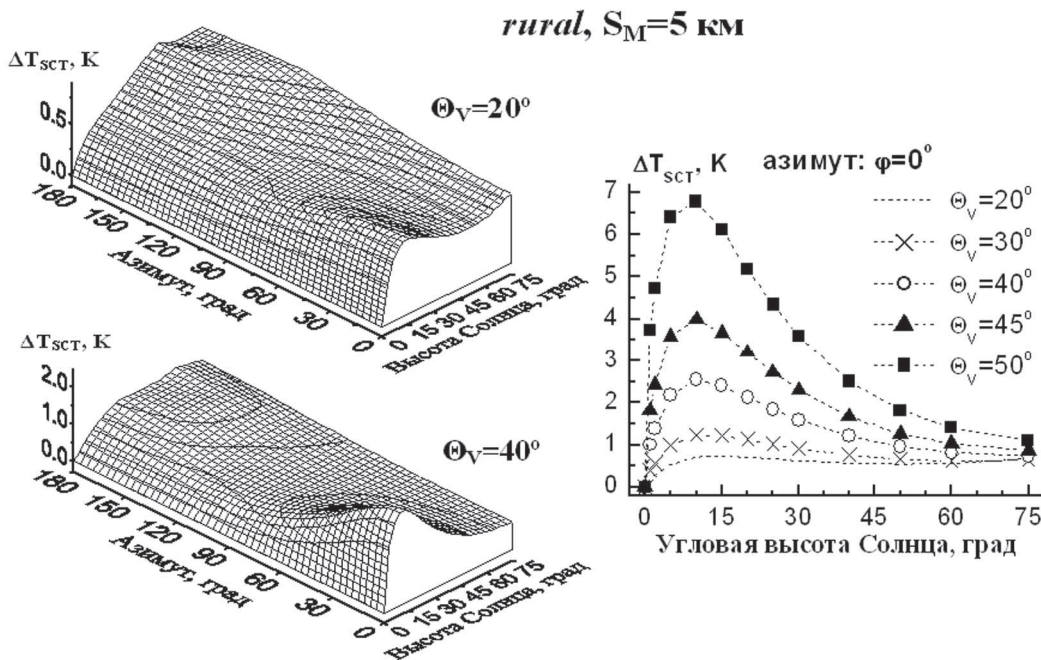


Рис. 1. Вклад ΔT_{SCT} рассеянного солнечного излучения в радиационную температуру в канале $\lambda = 3.7$ мкм в зависимости от геометрии (Θ_V, φ) спутниковых наблюдений: континентальный (rural) аэрозоль, $S_M = 5$ км

В первую очередь отметим, что с ростом угла сканирования Θ_V и аэрозольной оптической толщины (АОТ) проявляется заметная азимутальная зависимость величины ΔT_{SCT} . В области малых значений высоты Солнца H_S порядка 10° при азимутах наблюдений $\varphi < 50^\circ$ на-

блюдается формирование локального максимума величины ΔT_{SCT} , амплитуда которого растет вместе с углом Θ_V и аэрозольной оптической толщиной τ . Зависимость ΔT_{SCT} от АОТ и Θ_V можно охарактеризовать следующим образом:

- при малых угловых высотах Солнца ($H_S \sim 10-15^\circ$) наблюдается локальный максимум интенсивности ΔT_{SCT} , а при значениях $\Theta_V > 30^\circ$ проявляется её заметная азимутальная зависимость;
- с ростом Θ_V амплитуда максимума увеличивается;
- наблюдается почти линейный рост ΔT_{SCT} (и амплитуды максимума) с увеличением альbedo однократного рассеяния аэрозоля ω_A ;
- с увеличением τ происходит рост ΔT_{SCT} .

В зависимости от параметров Θ_V , τ_{aer} и типа аэрозоля для различных азимутальных углов амплитуда максимума может заметно отличаться. На рис. 2, представлены азимутальные различия величины ΔT_{SCT} . Для больших значений Θ_V и τ_{aer} величина $\delta T_{\text{SCT}}(\varphi)$ для аэрозоля континентального типа (*rural*) при $\omega_A > 0.9$ достигает значений 10 К. Таким образом, в зависимости от типа аэрозоля при $\tau > 0.1-0.5$ вклад рассеянного солнечного излучения в радиационную температуру может превышать пороговый уровень принятия решения о наличии очага горения в пикселе спутникового изображения. Очевидно, что этот вывод можно сформулировать и для оптически тонких слоев облачности.

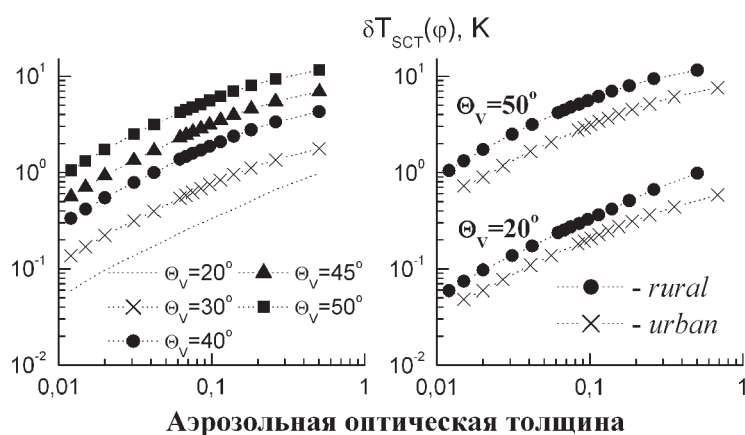


Рис. 2. Азимутальные различия ΔT_{SCT} для разных углов наблюдения Θ_V и значений АОТ

Анализ диапазонов углов H_S и φ , полученных для условий наблюдений г. Томска со спутников NOAA, позволяет сделать однозначный вывод о существовании области их значений, когда потенциально может возникать “аномальный” рост величины ΔT_{SCT} . В этой связи можно сделать два вывода. Первый – возможно появление бликов, которые вызваны не отражением солнечного излучения от водной поверхности или плотной облачности, а его рассеянием на аэрозольных и облачных частицах. Этим бликам и соответствует наблюдаемый на рис. 1 максимум при малых значениях угловой высоты Солнца H_S и относительного азимута наблюдений φ . Появление этого максимума физически объяснить несложно. Второй вывод состоит в том, что для корректного учета влияния оптико-геометрических условий наблюдений при решении задачи обнаружения тепловых аномалий из космоса необходимо выбирать пороговое значение для заданных геометрических условий и оптического состояния атмосферы, исходя из зависимостей, подобных тем, которые приведены на рис. 1.

Получив теоретическое описание процесса возникновения бликов в аэрозольных и облачных слоях, естественно, возникает необходимость найти практические примеры их проявления на спутниковых снимках, полученных при определенной геометрии наблюдений. Подобная работа была нами проведена. Рис. 3 иллюстрирует возникновение атмосферного блика на примере двух снимков территории Томской области (57.5-60.5° с.ш. и 79-85° в.д.), полученных 27 сентября 2003 года по данным радиометра AVHRR (спутники NOAA-12 и NOAA-15) в 17:25 и 18:19 по местному времени.

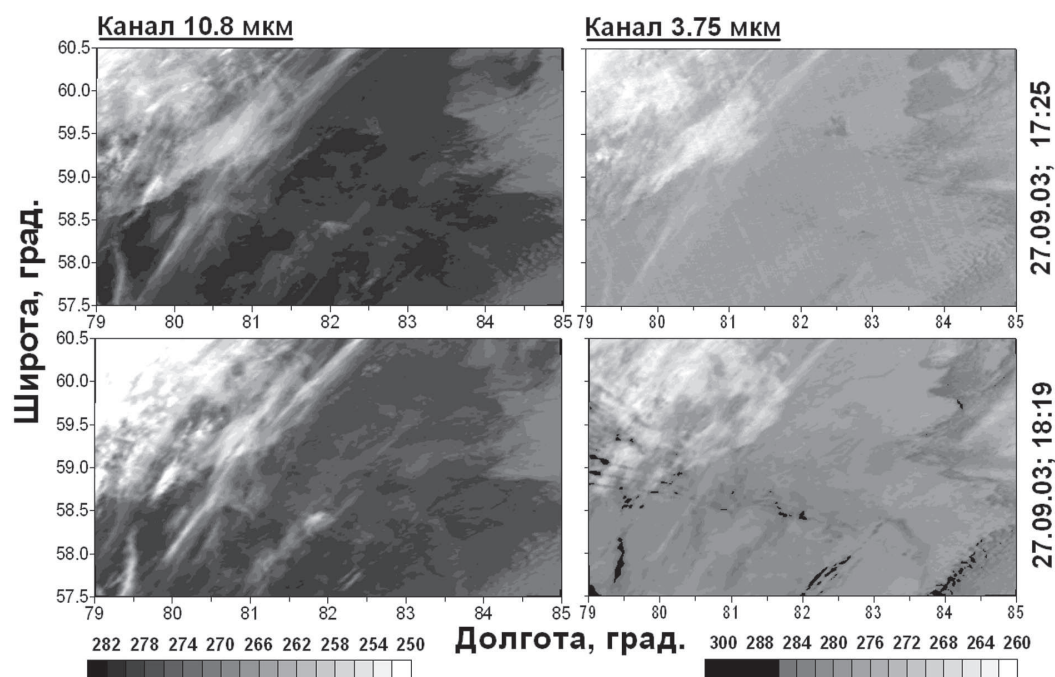


Рис. 3. Иллюстрации процесса появления солнечных бликов:
 а) спутниковые изображения в каналах $\lambda=10.8$ мкм и 3.75 мкм AVHRR;
 б) гистограммы яркостных температур T_3 и T_4

За временной интервал менее одного часа геометрия спутниковых измерений изменилась следующим образом:

- а) угловая высота Солнца H_s уменьшилась с 13° до 6° ;
- б) зенитный угол наблюдения Θ_v увеличился с 14° до 39° ,
- в) относительный азимут от 135° уменьшился до 15° .

Соответствующее изменение спутниковых измерений характеризуют данные табл. 1, где приведены статистические характеристики для альбеда A_1 в первом канале AVHRR ($\lambda=0.63$ мкм) и яркостных температур T_3 и T_4 в 3-ем и 4-ом каналах ($\lambda=3.75$ и 10.8 мкм). Эти данные получены для правой части изображения при отсутствии оптически плотной облачности.

Таблица 1. Статистические данные для правой части снимка (82-85° в.д.)

В первой строке среднее значение, во второй – минимальное и максимальное

Время	A_1 , %	T_3 , К	T_4 , К
17:25	3.18 1.32; 8.94	280.5 269.8; 288.0	277.4 262.5; 281.4
18:19	2.24 0.99; 10.82	279.3 270.4; 298.8	275.5 254.7; 279.8

Согласно приведенным выше расчетным данным геометрия наблюдений на втором снимке стала «благоприятной» для возникновения бликов на аэрозольных слоях и оптически тонких облачных образованиях. По спутниковым измерениям в каналах $\lambda=3.75$ и 10.8 мкм, согласно данным табл. 1, за 1 час температура безоблачных участков земной поверхности уменьшилась в среднем на 1-2 градуса, что по данным регулярных наземных измерений на метеостанциях Томской области согласуется с её суточным ходом. При этом статистические данные для канала $\lambda=0.63$ мкм в табл. 1 показали уменьшение значений A_1 в среднем в 1.4 раза, связанное с уменьшением угловой высоты Солнца и интенсивности падающего потока солнечного излучения.

На рис. 3 можно увидеть, что, несмотря на естественное уменьшение температуры земной поверхности, в канале $\lambda=3.7$ мкм на краях облаков и на отдельных участках изображения, где наблюдаются оптически тонкие облачные образования, происходит рост яркостной температуры почти на 11 К (см. табл. 1). Причиной этого являются атмосферные блики за счет рассеянного солнечного излучения.

2. Дневные блики на краях облака

Для анализа условий возникновения солнечных бликов при дневных измерениях нами был использован фрагмент изображения Томской области (рис. 4), полученный из космоса по данным прибора AVHRR со спутника NOAA-12.

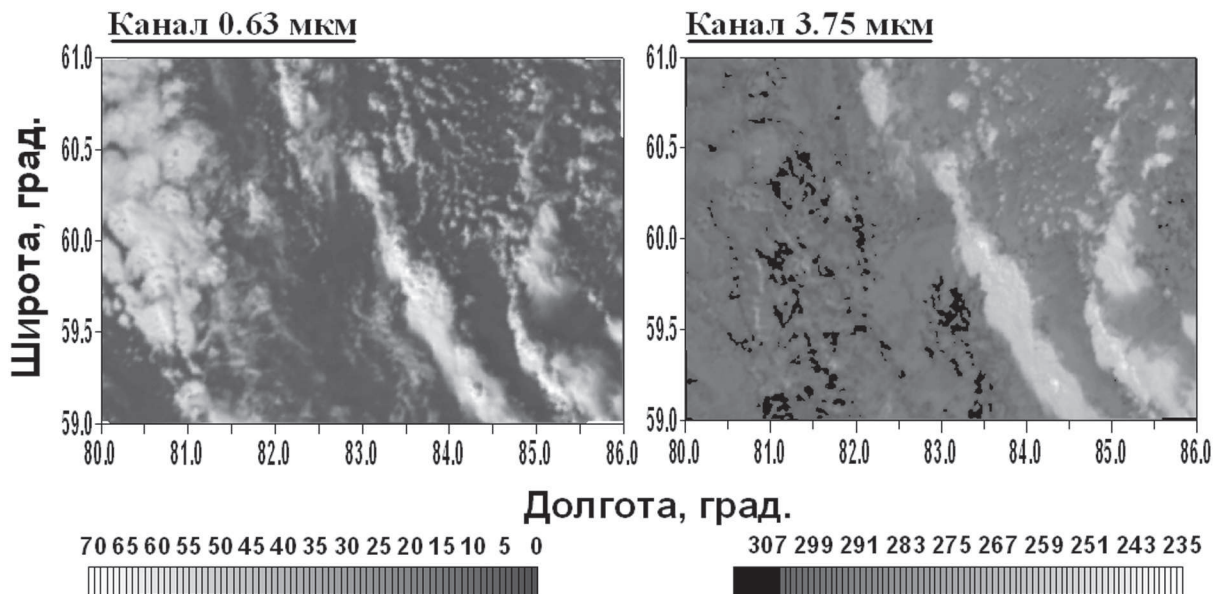


Рис. 4. Спутниковые изображения AVHRR в каналах $\lambda=0.63$ и 3.75 мкм.

В канале $\lambda=3.75$ мкм черным цветом выделены пиксели со значениями $T_3 > 305$ К

Данные получены 2 августа 2000 года в 15:53 по местному времени для участка поверхности с координатами $59-61^\circ$ с.ш. и $80-86^\circ$ в.д. Средняя угловая высота Солнца составила около 50° , относительный азимут – около 15° , зенитный угол – от 19° до 42° .

На выбранном участке изображения, наряду с безоблачными участками земной поверхности, присутствует облачность нижнего и среднего яруса и наблюдается значительное

количество высокотемпературных аномалий. В канале $\lambda=0.63$ мкм наблюдается обычная ситуация – высокие значения альбедо A_1 соответствуют плотной облачности и A_1 не превышает уровня 10-30% на краях облака. В канале $\lambda=3.75$ мкм картина становится более сложной, и высокие значения яркостной температуры $T_3 > 305$ К наблюдаются как для плотных участков облака, так и в большом количестве на его краях. Значения яркостной температуры для облачности среднего яруса не превышают 270 К, а температура на краях облака лежит в диапазоне 275-280 К. Для сравнения отметим, что яркостная температура безоблачных участков суши составляет величину порядка 293 ± 3 К.

На рис. 5 приведены данные, иллюстрирующие соотношения между A_1 и T_3 (а также гистограммы этих величин), которые подтверждают выводы о возможном появлении яркостных температур $T_3 > 305$ К для условий относительно низких значений альбедо A_1 . Для объяснения причин этого явления нами проведен анализ оптических и геометрических условий возникновения солнечных бликов на спутниковых снимках в каналах спектрального диапазона 3.5–4 мкм на основе численных экспериментов, моделирующих процесс формирования спутниковых изображений в присутствии аэрозольных образований и полей облачности.

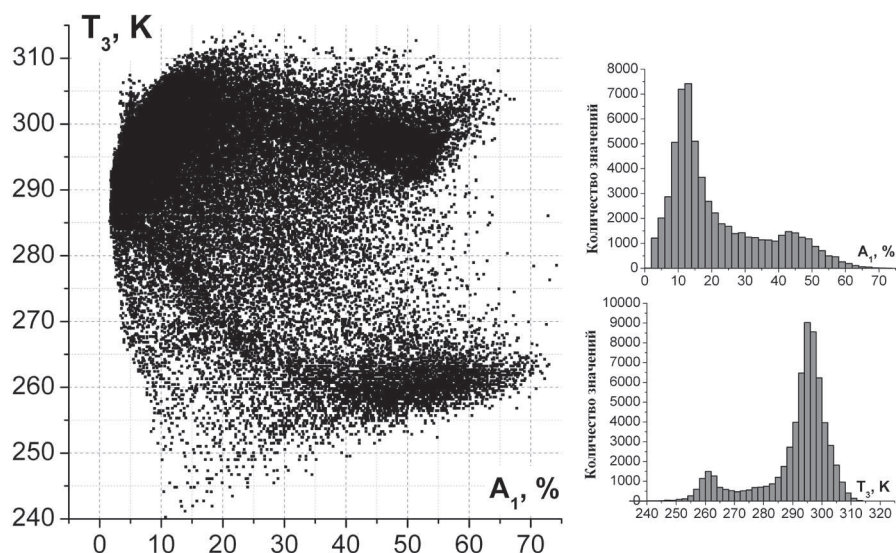


Рис. 5. Зависимость T_3 от альбедо A_1 .

Гистограммы значений альбедо A_1 и яркостной температур T_3

На рис. 6 представлены результаты имитационного моделирования спутниковых измерений прибором AVHRR облачности нижнего яруса. В качестве расчетной модели нами применялась программа Streamer_v3.0, в которой для учета эффектов многократного рассеяния солнечного излучения используется метод дискретных ординат (DISORT). При моделировании, в числе других, были рассмотрены оптико-метеорологические условия и геометрия наблюдений, соответствующие спутниковым изображениям на рис. 4. Для облачности варьировались два параметра – эффективный радиус частиц r_{ef} в диапазоне от 2 мкм до 16 мкм и оптическая толщина облака τ_{cld} от 1 до 32. Перечень других параметров приведен ниже:

- профили метеопараметров получены по спутниковым данным TOVS;
- углы наклона оси прибора $\Theta_v = 0^\circ$ и 45° ;
- азимуты наблюдений $\varphi = 15^\circ$ и 135° ;

- аэрозоль – фоновый континентальный, $S_M = 23$ км;
- содержание облака в пикселе – 100%;
- верхняя граница облака 3 км, нижняя граница облака 2 км;
- подстилающая поверхность – ламбертовская, состоящая на 50% из растительности и на 50% из хвойного леса.

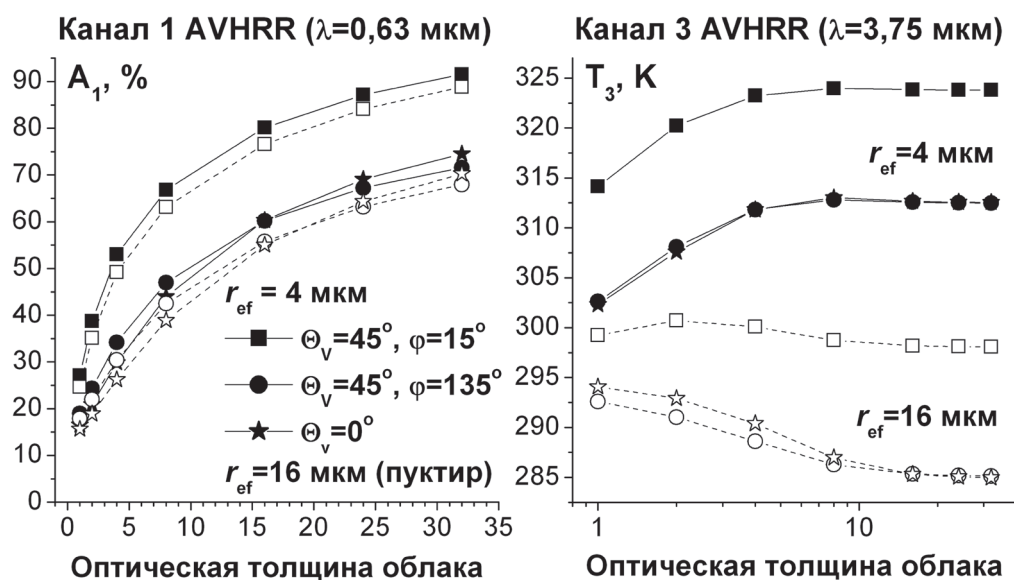


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования спутниковых измерений при различных значениях эффективного радиуса частиц и оптической толщины облака

Анализ расчетных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Как и следовало ожидать, рост оптической толщины облака приводит к монотонному росту значений альбедо A_1 во всем диапазоне значений r_{ef} . При этом величина эффективного радиуса частиц слабо влияет на величину альбедо. Это объясняет отсутствие в этом канале ярких аномалий на краях облака.

2. С уменьшением эффективного радиуса частиц происходит заметный рост значений яркостных температур T_3 для всех рассмотренных геометрий наблюдений. Зависимость величины T_3 от оптической толщины облака, так же, как и в первом канале AVHRR, является монотонно возрастающей. Вместе с тем, для условно «больших» частиц ($r_{ef} \sim 16$ мкм) зависимость яркостной температуры T_3 от оптической толщины облака становится монотонно убывающей.

В целом можно сделать вывод, что при эффективных радиусах облачных частиц $r_{ef} < 8$ мкм даже для относительно небольших значений оптической толщи $\tau_{cl} < 3$ яркостная температура может достигать значений, превышающих 305-310 К, создавая блики на полупрозрачной облачности. Дополнительное влияние оказывает прохождение через края облака теплового излучения подстилающей поверхности и отраженного от поверхности потока падающего солнечного излучения.

Проведенные в работе исследования физических причин и условий возникновения солнечных бликов, безусловно, не являются полными и законченными. Необходимо их продолжение, что позволит в итоге построить физически обоснованную модель возникающих на спутниковых ИК-изображениях солнечных бликов, которую можно будет эффективно

использовать на практике для фильтрации бликов при обработке данных инфракрасного зондирования подстилающей поверхности из космоса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-01-00673-а, Государственных контрактов № 14.740.11.0204 (от 15.09.2010) и № 02.740.11.0674 (от 29.03.2010).

Литература

1. *Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J.* An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // *Remote Sens. Environ.* 2003. V.83. P. 273–282.
2. *Giglio L., Kendall J.D.* Commentary on “Improving the seasonal cycle and interannual variations of biomass burning aerosol sources» by Generoso et al. // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V.4. P. 584-587.
3. *Ji Y., Stocker E.* An overview of the TRMM/TSDIS fire algorithm and product // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 23. P. 3285–3303.

Physical causes for appearance of atmospheric glints on satellite IR images

S.V. Afonin ^{1,2}, V.V. Belov ^{1,2}

¹*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia;*
²*Tomsk State University,
36 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: afonin@iao.ru, belov@iao.ru*

In the work, numerical simulation results and actual satellite data are used to analyze the relation between atmospheric scattering and appearance of sun glints on satellite IR images, obtained in the channels of the wavelength range 3.5–4 μm for the meteorological conditions of the turbid atmosphere. We considered the physical causes and optical-geometric conditions for manifestation of this effect during remote monitoring of Earth from space.

Keywords: IR range, satellite images, atmospheric glints, causes for appearance.