

УДК 551.591.3

*С. С. Орлов***Интенсивность рассеянного света безоблачной атмосферой в ближней инфракрасной области спектра***S. S. Orlov***Scattered Light Intensity of Cloudless Atmosphere in Near-Infrared Spectrum**

Рассматривается вопрос о возможности создания дополнительного метода калибровки данных наблюдений яркости дневного неба в инфракрасной области спектра, обеспечивающего исключение с приемлемой точностью абсолютных погрешностей измерений. Предлагается алгоритм решения задачи и подобрана соответствующая база данных. Путем решения уравнения переноса излучения модифицированным методом Монте-Карло, разработанным в Институте оптики атмосферы СО РАН, выполнены подробные расчеты яркости неба в ближней инфракрасной области спектра 1,02 мкм. Осуществлена оценка вклада компонент, обусловленных первичным, многократным рассеянием и отражением света от подстилающей поверхности, в суммарную яркость неба. Исследована их зависимость от вытянутости аэрозольной индикатрисы рассеяния, аэрозольной оптической толщи, зенитного угла Солнца и угла рассеяния. Такой анализ роли атмосферных параметров в формировании яркости с высокой точностью может рассматриваться как основа для разработки новых методов калибровки исходных данных, определения альбедо местности, спектра размеров частиц и других практических задач физики атмосферы.

**Ключевые слова:** яркость неба, инфракрасная область спектра, оптическая толщина, альбедо, многократное рассеяние.

**DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-49**

Отмечаемые в последнее время большинством исследователей климатические изменения, происходящие на земном шаре, требуют тщательного контроля вариаций параметров атмосферы и подстилающей поверхности, ответственных за эти изменения [1–3]. В такой ситуации особое значение обретают вопросы стандартизации наблюдательных данных, для чего порой следует использовать нестандартные подходы. Они должны базироваться на современных математических и физических представлениях и в итоге поднимать уровень достоверности окончательных результатов [4–6].

В настоящей работе рассматривается возможность применения данных наблюдений яркости неба

The possibility of an additional method development for calibrating observation data of daytime sky brightness in the near-infrared spectrum with acceptable accuracy and measurement errors is the question under consideration in this paper.

An algorithm for solving the problem with an appropriate database is proposed. Radiative transfer equation is solved with a modified Monte Carlo method developed by the Institute of Atmospheric Optics. Detailed calculations of sky brightness in the near-infrared spectrum (1.02 microns) are performed. Impact of primary and multiple scattering, reflection of light from underlying surface on the total brightness of the sky are evaluated. Dependences of those effects on elongation of aerosol scattering indicatrix, aerosol optical depth, solar zenith angle, and scattering angle are investigated. Such analysis of atmospheric parameters and their impact on the total brightness of the sky can be considered as the basis for development of new methods for calibration of source data, albedo and particle sizes evaluation, and other practical problems of atmospheric physics.

**Key words:** brightness of sky, infrared spectrum, optical depth, albedo, multiple scattering.

при малых аэрозольных толщах атмосферы в инфракрасной (ИК) области спектра при последующей калибровке измерений яркости при любой мутности атмосферы. Конечная цель такой работы состоит в уменьшении абсолютных погрешностей измерений яркости в абсолютных единицах при втором условии. Следует заметить, что подобная работа уже была выполнена для видимой области спектра [6], где при малых аэрозольных оптических толщах атмосферы ( $\tau_a \leq 0.01 \sim 0.02$ ) в солнечном альмукантарате яркость неба после внесения малых поправок носит практически молекулярный характер. Естественно, при этом необходим учет эффектов отражения света от подстилающей поверхности и многократного

рассеяния, что осуществляется с помощью данных решения уравнения переноса излучения в атмосфере. В ИК области можно ожидать наличие другого преимущества при калибровке данных измерений яркости. Здесь заведомо чаще, чем в видимом диапазоне, реализуется случай малых оптических толщ как молекулярного, так и аэрозольного рассеяния, и при не слишком больших зенитных углах Солнца ( $z_0 \leq 70^\circ$ ) яркость неба преимущественно определяется процессами однократного рассеяния света. Это обстоятельство при должном учете отраженного от подстилающей поверхности излучения, видимо, может быть положено в основу разработки калибровочного метода наблюдаемой яркости при больших значениях  $\tau_a$ .

Представим яркость безоблачного неба в солнечном альмукантарате в виде суммы трех компонент [7]:

$$B(\varphi, q, z_0) = B_1(\varphi, z_0) + B_2(\varphi, z_0) + B_q(q, z_0), \quad (1)$$

где  $B_1(\varphi, z_0)$  — яркость, обусловленная однократным рассеянием;  $B_2(\varphi, z_0)$  и  $B_q(q, z_0)$  — соответственно компоненты многократного рассеяния и отражения излучения от подстилающей поверхности с альбедо  $q$ ;  $\varphi$  — угол рассеяния.

Отражение света будем считать ортотропным. Задача состоит в тщательном исследовании угловой структуры яркости  $B_2(\varphi, z_0) + B_q(q, z_0)$  при разных значениях альбедо подстилающей поверхности, в разных длинах волн  $\lambda$ , при разных аэрозольных оптических толщах  $\tau_a$  и индикатрисах аэрозольного рассеяния  $f_a(\varphi)$  с различной степенью асимметрии:

$$\Gamma_a = \frac{\int_0^{\pi/2} f_a(\varphi) \cdot \sin\varphi d\varphi}{\int_{\pi/2}^{\pi} f_a(\varphi) \cdot \sin\varphi d\varphi}, \quad (2)$$

где  $f_a(\varphi)$  — аэрозольная индикатриса однократного рассеяния, зависящая от типа аэрозольных частиц и угла рассеяния.

Совершенно естественно, что расчеты яркости дневного неба могут быть выполнены только на основе каких-либо модельных представлений об аэрозоле. Такие оптические модели в настоящее время опубликованы во множестве статей. По приводимым данным можно констатировать, что в безоблачной атмосфере частицы чаще всего присутствуют в форме трех фракций с нормальными логарифмическими распределениями по размерам [8–9]: ядра Айткена, средне- и грубодисперсная фракции. По нашей просьбе, Т. В. Бедаревой в Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева для расчетов индикатрис рассеяния были подобраны фракции с такими параметрами, чтобы вычисленные для этих групп частиц индикатрисы  $f_a(\varphi)$  имели значения коэффициентов асимметрии  $\Gamma_a$ , равные 6, 10 и 15. Тем самым путем их комбинирования в разных пропорциях можно определять веса для разных типов частиц в их суммарном содержании в атмосфере. В итоге это позво-

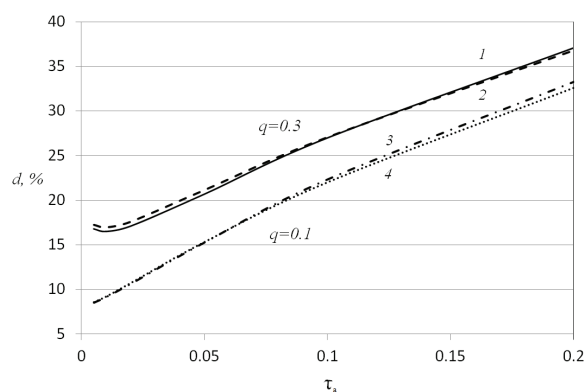
лило охватить расчетами яркости данных большинство реализуемых в природе ситуаций.

Значения альбедо подстилающей поверхности  $q$  варьировались в расчетах от 0 до 0,3. Значение  $q = 0$  не встречается в природе. Тем не менее расчеты яркости по формуле (1) при нулевом втором члене справа позволяют «в чистом виде» судить об абсолютной величине и угловой зависимости компоненты  $B_2(\varphi, z_0)$ :

$$B_2(\varphi, z_0) = B(\varphi, q, z_0) - B_1(\varphi, z_0). \quad (3)$$

Зенитный угол Солнца на первом этапе исследования был выбран равным  $70^\circ$ , что позволяло рассчитывать яркость неба в диапазоне углов рассеяния  $0 \leq \varphi \leq 140^\circ$ . При вычислениях компонент яркости аэрозольные оптические толщи атмосферы  $\tau_a$  менялись в пределах от 0.002 до 0.5. Такие вариации, с одной стороны, соответствуют исключительно высокой, по сути, молекулярной прозрачности и существенной загрязненности атмосферного воздуха аэрозолями — с другой. Учитывалось и незначительное аэрозольное поглощение (толща поглощения составляла около 5% от общей аэрозольной оптической толщи). Длина волны выбрана равной 1.02 мкм, для которой молекулярная оптическая толща на уровне моря равна 0.007, причем в этой области спектра молекулярное поглощение света практически отсутствует.

Ниже обсуждаются предварительные результаты вычислений яркости неба в результате решения уравнения переноса излучения высокоточным модифицированным методом Монте-Карло. Метод был разработан Т. Б. Журавлевой [10], и ею в наше распоряжение было любезно предоставлено соответствующее программное обеспечение. Относительные погрешности расчетов яркости не превышают долей процента.



Вклад компонент многократного рассеяния и отражения света от подстилающей поверхности  $d$ , % в суммарную яркость неба: 1 —  $\Gamma_a = 6$ ,  $q = 0.3$ ; 2 —  $\Gamma_a = 10$ ,  $q = 0.3$ ; 3 —  $\Gamma_a = 6$ ,  $q = 0.1$ ; 4 —  $\Gamma_a = 10$ ,  $q = 0.1$

На рисунке представлены зависимости вклада  $d$  (в %) сумм двух компонент  $B_2(\varphi, z_0) + B_q(q, z_0)$  в суммарную яркость  $B_2(\varphi, q, z_0)$  как функции аэрозольной оптической толщи, которая первоначально в численном эксперименте менялась от 0.002 до 0.2. Значения альbedo подстилающей поверхности приняты равными 0.1 и 0.3. Коэффициент асимметрии аэрозольной индикатрисы соответствовал двум типичным аэрозольным фракциям частиц со значениями  $\Gamma_a = 6$  и  $\Gamma_a = 10$ . Отчетливо видно, что вклад отраженного света в  $B_2(\varphi, z_0)$  в существенной мере растет с увеличением ее альbedo (нижний и верхний

графики) и в меньшей степени — с уменьшением оптической толщи (тренд справа налево). Еще меньше меняется  $d$  с вариациями  $\Gamma_a$ , если фиксировано значение альbedo подстилающей поверхности. Последнее обстоятельство в разработках калибровочного метода представляется наиболее существенным: добавочная яркость слабо зависит от типа частиц в атмосфере. Отсюда следует целесообразность последующих исследований в разработке калибровочного метода.

*Автор благодарит профессора Владимира Евгеньевича Павлова за помощь при выполнении настоящей работы.*

## Библиографический список

1. Израэль Ю. А. О состоянии современного климата и предложения о деятельности в области противодействия изменению климата // Метеорология и гидрология. — 2008. — № 10.
2. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствий на территории Российской Федерации. Т. 1: Изменение климата. — М., 2008.
3. Покровский О. М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследование Земли из космоса. — 2010. — № 5.
4. Aerosol Robotic Network (AERONET). URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
5. Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., King M., Kaufman Y., Eck T., Slutsker I. Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET). Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. — 2000. — V. 105, № 8.
6. Pavlov V. E., Khvostova N. V., Panchenko M. V., Terpugova S. A. Indirect method for estimation of the errors in measurements of sky irradiance with sun-photometers CIMEL: calibration by molecular scattering. International Journal of the Remote Sensing. — 2011. — Vol. 32, Issue 23.
7. Смеркалов В. А. Прикладная оптика атмосферы. — СПб., 1997.
8. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Аэрозольные модели атмосферы. — М., 1981.
9. Зуев В. Е., Креков Г. М. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2: Оптические модели атмосферы. — Л., 1986.
10. Журавлева Т. Б., Насретдинов И. М., Сакерин С. М. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с поверхности Земли. Ч. I: Аэрозольная атмосфера // Оптика атмосферы и океана. — 2003. — Т. 16, № 5–6.