

УДК 551.521.3

УЧЕТ РЕЛЕЕВСКОГО РАССЕЙНИЯ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Терез Э.И., Терез Г.А., Лагунова М.И.

*Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: terez@crimea.edu, terez@crimea.edu, lagunovamariya@mail.ru*

Сделан обзор исследований, посвященных определению релеевской оптической толщины атмосферы. Показано, что существует некоторая неопределенность при вычислении величины релеевского рассеяния, особенно в синей и ультрафиолетовой областях спектра. Сделана оценка возможных погрешностей в определении релеевской оптической толщины атмосферы при использовании в расчетах средней высоты данного места наблюдений.

Ключевые слова: релеевская оптическая толщина, точность расчетов, аномально высокая прозрачность, атмосферное давление.

ВВЕДЕНИЕ

Точная оценка величины релеевского рассеяния в земной атмосфере необходима для определения аэрозольной оптической толщины и коэффициентов Ангстрема - основных параметров, характеризующих спектральную прозрачность атмосферы данного региона. В настоящее время экспериментально, используя метод Бугера-Лэнгли, можно измерить только общую оптическую толщину атмосферы $\tau(\lambda)$. Но величина $\tau(\lambda)$ является суммой следующих компонент

$$\tau(\lambda) = \tau_{\text{рел}}(\lambda) + \tau_{\text{аэр}}(\lambda) + \tau_{\text{мол}}(\lambda), \text{ где} \quad (1)$$

$\tau_{\text{рел}}(\lambda)$ – релеевская оптическая толщина,

$\tau_{\text{аэр}}(\lambda)$ – аэрозольная оптическая толщина,

$\tau_{\text{мол}}(\lambda)$ – истинное молекулярное поглощение в полосах атмосферных газов.

При проведении фотометрических наблюдений вне молекулярных полос поглощения ($\tau_{\text{мол}}(\lambda) = 0$), согласно формуле (1) аэрозольная оптическая толщина равна

$$\tau_{\text{аэр}}(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_{\text{рел}}(\lambda) \quad (2)$$

При этом предполагается, что релеевская оптическая толщина $\tau_{\text{аэр}}(\lambda)$ может быть определена эмпирически с необходимой точностью. Однако различные методики расчета коэффициентов релеевского рассеяния дают значительное расхождение результатов. Поэтому несмотря на большой объем исследований, выполненных в этой области, астрономы и геофизики периодически возвращаются к вопросу учета величины релеевского рассеяния.

1. ОБЗОР РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЛЕЕВСКОГО РАССЕЙНИЯ

Согласно классической теории величина релеевского рассеяния определяется по формуле

$$\tau_{\text{рел}} \sim \lambda^{-4} \quad (3)$$

Однако это справедливо для идеального газа. Для вывода формулы расчета релеевского рассеяния реальной атмосферы необходимо учитывать изменение показателя преломления воздуха от длины волны и фактор деполяризации, который возникает вследствие анизотропии молекул воздуха и который тоже меняется в зависимости от длины волны. Одна из первых работ, где были выполнены тщательные расчеты коэффициентов релеевского рассеяния и оптических толщин стандартной изотермической атмосферы, т.е. при условии, что воздух сухой, содержащий 0,03% CO₂ в единице объема при нормальном давлении 760 мм Hg (1013.25 мб) и температуре воздуха 15°C в спектральной области 0,2 мкм - 20,0 мкм, была работа Пендорфа [1]. Элтерман [2, 3] расширил исследования Пендорфа, добавив в таблицы величины коэффициента объемного релеевского рассеяния и релеевской оптической глубины в качестве функции длины волны (0,27 – 4,0 мкм) и высоты (0 - 50 км) используя данные стандартной атмосферы США, 1962 [4]. Он также использовал формулу Эдлена [5] для индекса преломления воздуха и постоянную величину 0.035 для фактора деполяризации. Основываясь на последних данных деполяризации, Хойту [6] удалось создать таблицу величин релеевской оптической глубины в качестве функции длины волны (0,3 – 1,5 мкм) для шести стандартных атмосфер с помощью формулы Эдлена [5] для индекса преломления и постоянной величины деполяризационного фактора 0,0139. Немного позднее Фрëлих и Шоу [7], на основании новых данных об оптических параметрах атмосферы сделали перерасчет значений релеевской оптической толщины в области спектра 0,2 мкм - 1,5 мкм для пяти стандартных атмосфер [8]. При этом было использовано значение фактора деполяризации, полученное ранее Хойтом [6]. Результаты Фрëлиха и Шоу ниже данных Пендорфа на 4,5 %, что, по-видимому, объясняется заниженным значением фактора деполяризации, которое согласно Янгу [9] должно быть 0,0279. Дас и Икбэл [10] провели сравнение коэффициентов релеевского рассеяния в спектральной области 0,3 мкм - 0,9 мкм, полученных Лекнером [11] с показателем степени равным 4,08 и основанных на теоретической работе Пендорфа; коэффициентов релеевского рассеяния, вычисленных Эльтерманом [3], и коэффициентов релеевского рассеяния, полученных Кнайжисом [12]. Результаты оказались близкими. Следует также отметить исследования Бейтса [13], позволившими уточнить величину поперечного сечения молекулярного рассеяния. На основании данных Бейтса, Николет [14] предложил формулу для вычисления сечений релеевского рассеяния.

В фундаментальной работе Бучольца [15] были пересмотрены результаты предыдущих работ и представлен согласованный набор новых величин для поперечных сечении релеевского рассеяния, коэффициентов абсолютного релеевского рассеяния, а также релеевских оптических толщин для диапазона длин волн 0,2 мкм - 4 мкм путем использования наилучших оценок индекса преломления и фактора деполяризации воздуха. Более того, в вычисления также вошла дисперсия фактора деполяризации в зависимости от длины волны. Представлено также сравнение величин, полученных в данной работе, с предыдущими вычислениями параметров релеевского рассеяния, а также заново определены

значения релеевской оптической толщины для стандартной атмосферы (США, 1962) и для пяти вспомогательных моделей с учетом сезонных и широтных вариаций. Новые значения релеевских оптических толщин примерно на 3 % в видимой и до 10 % в УФ области выше, полученных ранее.

Учитывая значительное расхождение в результатах теоретических расчетов, ряд авторов пытались найти эмпирическую формулу для определения величины релеевского рассеяния. Так, в области спектра 500 нм - 1200 нм формула (4) для релеевской оптической толщины, предложенная в работе [16], дает хорошие результаты для аппроксимации экспериментальных наблюдений

$$\tau_R = 0,00879 \left(\frac{P}{P_0} \right) \lambda^{-4,09} . \quad (4)$$

Терез [17] на основании сравнения модельных расчетов и экспериментальных данных предложила для расчетов коэффициентов релеевского рассеяния в области спектра 300 нм - 500 нм. следующую формулу для $P = 1013,25$ мб

$$\tau_R = -2,022 + 2,654 \left(\frac{1}{\lambda} \right) - 1,186 \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 + 0,201 \left(\frac{1}{\lambda} \right)^3 . \quad (5)$$

Погрешность аппроксимации релеевской оптической толщины по формуле (5) менее 0,2 % в области 320 - 500 нм, в ультрафиолетовой области спектра погрешности возрастают (для длин волн 320 нм и 300 нм - 0,3 % и 0,6 % соответственно).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РЕЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Из формулы (2) видно, что погрешность определения аэрозольной оптической толщины определяется погрешностью измерения общей толщины атмосферы τ (λ) и погрешностью вычисления значения релеевского рассеяния. Современные фотометрические наблюдения в местах с хорошим астроклиматом позволяют минимизировать погрешности измерений величин $\tau(\lambda)$ до 0,1 % – 0,2%. Поэтому основной вклад в ошибки определения аэрозольной оптической толщины спектра вносят неточности вычисления релеевской оптической толщины. Это особенно сильно проявляется в синей и ультрафиолетовой областях спектра и при наблюдениях в условиях высокогорья, в Арктике и особенно сильно в Антарктиде [18]. Этот эффект, так называемой аномально высокой прозрачности (общая оптическая толщина атмосферы τ (λ) меньше 0,1), был обнаружен еще в 70-х годах Родионовым [19]. В условиях такой аномальной прозрачности неточность определения релеевской оптической толщины приводит к тому, что в ультрафиолетовой области спектра получаются отрицательные величины аэрозольной оптической толщины [20], что соответствует прозрачности атмосферы более 100 % и потому не имеет физического смысла. Примеров подобных наблюдений, выполненных и в Украине и за рубежом, достаточно много. Так, в работе [21] авторы на основании проведенных солнечных фотометрических наблюдений заявили об аномально высокой прозрачности атмосферы (т.е. об очень

малой величине аэрозольной оптической толщины) в ультрафиолетовой области спектра на высокогорной станции НАН Украины «Терскол». Однако позже в работе [22] было показано, что в этой работе были неверно вычислены значения релейской оптической толщины. Отсюда и заниженные значения $\tau_{\text{аэр}}(\lambda)$.

Следует отметить, что в настоящее время единственная возможность уточнить формулы для расчета релейской оптической толщины – это провести прецизионные фотометрические наблюдения в местах с минимальным количеством атмосферного аэрозоля. (Минимизировать величину $\tau_{\text{аэр}}(\lambda)$ в формуле (2)). Безусловно лучшим местом для таких наблюдений является Антарктида. Однако предварительные наблюдения на антарктической станции «Академик Вернадский» показали, что здесь возникают новые проблемы.

Величина оптической толщины атмосферы $\tau(\lambda)$ в настоящее время измеряется экспериментально из натуральных наблюдений по методике Бугера-Лэнгли. Суть этой методики состоит в том, что согласно закону Бугера, интенсивность потока лучистой энергии, прошедшего сквозь атмосферу от астрономического источника, находящегося на зенитном расстоянии Z , равна

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^{\circ} \cdot e^{-\tau(\lambda)X}, \quad (6)$$

где I_{λ}° - интенсивность потока лучистой энергии на границе атмосферы для данной длины волны λ ; $\tau(\lambda)$ - оптическая толщина атмосферы. Она связана с коэффициентом спектральной прозрачности атмосферы p соотношением

$$p_{\lambda} = e^{-\tau(\lambda)} \quad \text{или} \quad \tau(\lambda) = -\ln p \quad (7)$$

где X - величина, называемая воздушной массой. Эта величина определяется оптической толщиной атмосферы на зенитном расстоянии Z по отношению к оптической толщине в зените, принимаемой за единицу, т.е. $X = \sec Z$ (для зенита $X = \sec 0^{\circ} = 1$).

Если учесть, что величина $e^{-\tau(\lambda)}$ представляет собой коэффициент спектральной прозрачности атмосферы в зените p_{λ} , то формулу (2) можно представить в виде

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^{\circ} \cdot p_{\lambda}^X$$

в логарифмической форме

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{\lambda}^{\circ} + X \cdot \ln P_{\lambda}, \quad (8)$$

или

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{\lambda}^{\circ} - X \cdot \tau(\lambda). \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что зависимость $\ln I_{\lambda}$ от воздушной массы X представляет собой прямую линию. Очевидно, что экстраполяция ее до нулевой воздушной массы даст величину $\ln I_{\lambda}^{\circ}$, а угол наклона к оси абсцисс позволит определить оптическую толщину атмосферы $\tau(\lambda)$.

Следует отметить, что метод Бугера-Лэнгли становится совсем непригодным при определении оптической толщины атмосферы для арктических и антарктических станций. Как видно их формулы (5) согласно методу Бугера-Лэнгли для получения величин $\tau(\lambda)$ необходимо выполнить фотометрические наблюдения Солнца на двух (минимум) разных воздушных массах X (получается

два уравнения с двумя неизвестными $\ln I_{\lambda}^{\circ}$ и $\tau(\lambda)$). При этом, чем больше разность воздушных масс X , тем точнее можно определить значение $\tau(\lambda)$. Но Солнце летом в полярных широтах стоит низко над горизонтом, «ходит по кругу». И воздушные массы меняются незначительно.

Решением проблемы солнечных фотометрических наблюдений для высокоширотных станций является применение абсолютной калибровки наблюдательной аппаратуры.

Согласно уравнению (5) в каждый момент наблюдений можно определить значение $\tau(\lambda)$ по формуле

$$\tau(\lambda) = 1 / X (\ln I_{\lambda} - \ln I_{\lambda}^{\circ}). \quad (10)$$

При этом подразумевается, что известна величина внеатмосферного потока от Солнца в системе инструмента $\ln I_{\lambda}^{\circ}$

Для определения величины I_{λ}° необходимо выполнить абсолютную калибровку солнечного фотометра, т.е. провести высококачественные солнечные фотометрические наблюдений в обсерватории с первоклассным астроклиматом (естественно, расположенной в южных или умеренных широтах). Целью таких наблюдений является определение внеатмосферного потока от Солнца $\ln I_{\lambda}^{\circ}$ для каждой длины волны по отношению к сигналу встроенного в фотометр светового эталона. В качестве светового эталона можно использовать отобранные, калиброванные светодиоды. По данным ВНИИ ОФИ удастся изготовить светодиоды с широким спектром излучения, имеющие стабильность излучения не хуже 0,1 % – 0,2 % в диапазоне температур – 30 ° - + 30 °.

3. ЭФФЕКТ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Существует еще один источник погрешностей при расчете величины релеевской оптической толщины. Это неточный учет атмосферного давления. Как видно из формулы (5) релеевская оптическая толщина зависит от атмосферного давления. По сложившейся практике при проведении расчетов давление определяется по барометрической формуле для данной высоты места наблюдения. Но атмосферное давление может меняться в зависимости от метеоусловий. На рис. 1 приведена кривая изменения давления в г. Симферополь за три года (более точно в парке «Салгирка», высота 265 м над уровнем моря).

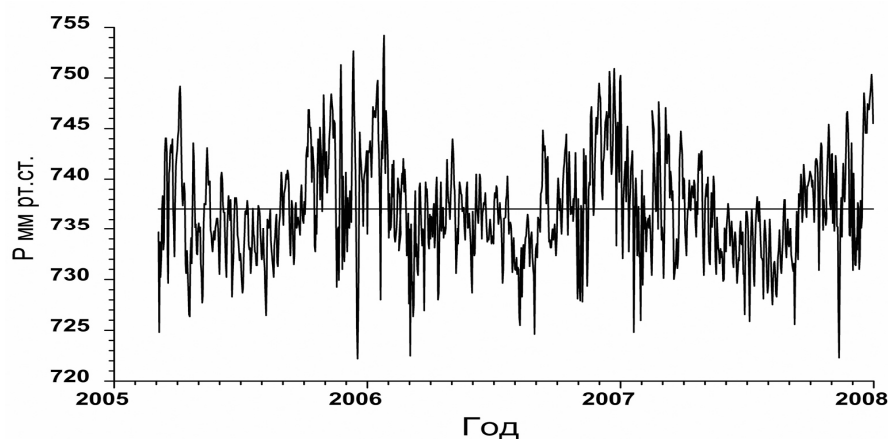


Рис.1. Кривая изменения атмосферного давления в г. Симферополь (парк «Салгирка», высота 265 м над уровнем моря)

Как видно из рис. 1, среднее значение атмосферного давления $P = 737,05$ мм рт. ст. Но оно может меняться в течение года в пределах от 722,20 мм до 754,31 мм. Насколько сильно повлияют эти изменения на оптическую толщины релеевского рассеяния? На рис. 2 приведены отклонения от среднего значения τ для минимальных и максимальных значений атмосферного давления в г. Симферополь.

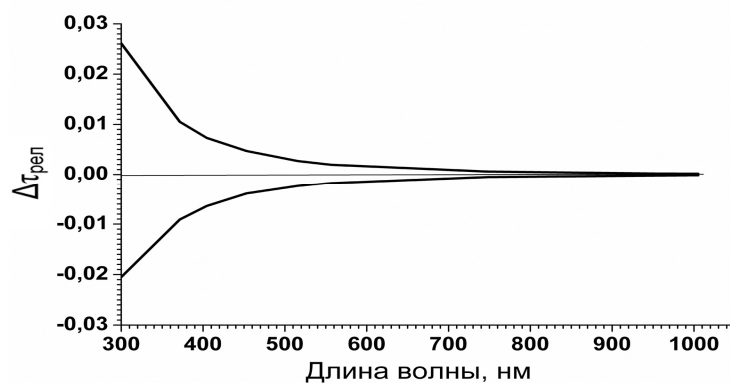


Рис.2. Отклонения от среднего значения релеевской оптической толщины для минимальных и максимальных величин атмосферного давления в г. Симферополь

Как видно из рис. 2 в видимой и ИК-областях спектра при вычислениях значений релеевской оптической толщины можно пользоваться с достаточной степенью точности средними значениями τ , определенными для среднего атмосферного давления данного места наблюдений. Однако при расчетах в УФ области спектра, особенно в местах с высокой прозрачностью атмосферы, где

общая оптическая толщина $\tau < 0,1$, необходимо при проведении фотометрических наблюдений регистрировать величину атмосферного давления.

ВЫВОДЫ

В настоящее время возможности для теоретического уточнения формулы релеевского рассеяния атмосферы практически исчерпаны. Необходимы экспериментальные исследования, т.е. проведение высокоточных фотометрических наблюдений в местах с высокой атмосферной прозрачностью. Таким местом может служить украинская антарктическая станция «Академик Вернадский».

Список литературы

1. Penndorf R. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μ and their application to atmospheric optics // J.Opt.Soc.Am.. – 1957. – V. 47. – P. 176-182.
2. Elterman L. Atmospheric attenuation model, in the ultraviolet, the visible, and the infrared windows for altitudes to 50 km // Environ. Res. Paper N46. U.S. Air Force Cambridge Research Laboratory. - Bedford, Mass, 1964. – 57 p.
3. Elterman L. UV, visible, and IR-attenuation for altitudes to 50 km // Environ. Res. Paper N285. (U.S. Air Force Cambridge Research Laboratory), 1968. - 59 p.
4. U.S.Standard Atmosphere, 1962. - Washington, D.C.: U.S.Government Printing Office, 1962. – 120 p.
5. Edlen B. Dispersion of standard air // J.Opt.Soc.Am.. – 1953. – V. 43. – P. 339-344.
6. Hoyt D.V. A redetermination of the Rayleigh optical depth and its application to selected solar radiation problems // J.Appl. Meteorol.. – 1977. – V. 16. – P. 432-436.
7. Frohlich C. and Shaw G.E. New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere // Appl. Opt. – 1980. – V. 19. P. 1773-1775.
8. U.S.Standard Atmosphere Supplement, 1966. - Washington, D.C. :U.S.Government Printing Office, 1966. – 65.
9. Young A.T. Revised depolarization corrections for atmospheric extinction // Appl. Opt. – 1980.- V. 19. –P. 3427-3428.
10. Das A.K., Iqbal M. Modifications to an algorithm to compute diffuse solar spectral radiation under clear skies // Rev. int. heliotechn.. – 1984. - N2. - P.2-6.
11. Leckner B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface-elements of a model //Solar energy. – 1978. - V.20. - P.143-150.
12. Kneizys F.X., Shettle E.P. et al. – 1980: Washington, D.C.: Air Force Geophysics Lab. Bedford. M., AFGLTR -80- 0067.
13. Bates D.R. Rayleigh scattering by air // Planet and Space Sci. – 1984. - V.32. - N 6. - P.785-790.
14. Nicolet M. On the molecular scattering in terrestrial atmosphere: an empirical formula for its calculation in the homosphere. Planet and Space Sci., 1984, V.32, N 11, P 1467-1468.
15. Bucholtz A. Rayleigh – scattering calculations for the terrestrial atmosphere // Appl. Optics. – 1995. - V. 34. – N 15. – P. 2765-2773.
16. Leiterer U., Schulz K.-H. Zur Abweichung des realen von dem nach der Rayleigh'schen Theorie berechneten Luftstruekoeffizienten // Gerlands Beitrage zur Geophysik. -1986. - Bb. 93. - Heft 3. - S. 262-266.
17. Терез Г. А. Об учете релеевского рассеяния при разделении атмосферной экстинкции на составляющие // Известия АН СССР, серия «Физика атмосферы и океана». -1990. Т 26. - № 5.- С. 550-553.
18. Leiterer U., Sakunow G. Messungen von Aerosolpartikeln im Grossenbereich 0,2 bis 4,0 μ in der Antarktis // Zeit. Meteorol. – 1989. - V. 39. - N 6. - S. 309- 316.
19. Родионов С.Ф. Электрофотометрические исследования на Эльбрусе. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1970. - 125 с.

20. Ghan S., Laulainen N., Easter R., Wagener R., Nemesure S., Chapman E., Zhang Y., Leung R. Evaluation of aerosol direct radiative forcing in MIRAGE // J. Geoph. Research. – 2001. -V. 106. - N D6. - P. 5295-5316.
21. Бурлов-Васильев К.А., Васильева И.Э. Спектральная прозрачность земной атмосферы в ближней УФ-области спектра // Известия АН СССР, серия «Физика атмосферы и океана». – 1992. – Т. 28. - № 12. – с. 1170-1175.
22. Терез Г. А. О точности разделения спектральной прозрачности атмосферы на компоненты // Известия АН СССР, серия «Физика атмосферы и океана». 1995. - Т. 8. - № 10. - с. 1545-1546.

Терез Е.І., Терез Г.А., Лагунова М.І. Визначення релеевського розсіювання земної атмосфери за фотометричними спостереженнями // Учені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. – 2008. – Серія «Фізика». – Т. 21(60). - №1– С. 117-124.

У статті виконано огляд досліджень, присвячених визначенню релеевської оптичної товщини атмосфери. Показано, що існує деяка невизначенність при вираховуванні величини релеевського розсіювання, особливо в синій та ультрафіолетовій областях спектру. Для уточнення теоретичних формул запропоновано провести високоточні фотометричні спостереження у місцях з особливо високою атмосферою прозорістю, наприклад, на антарктичній станції «Академік Вернадський». Надана оцінка можливих похибок у визначенні релеевської оптичної товщини атмосфери при використанні у розрахунках середньої висоти даного місця спостережень.

Ключові слова: Релеевська оптична товщина, точність розрахунків, аномально висока прозорість, атмосферний тиск.

Terez E.I., Terez G.A., Lagunova M.I. Determination of the Rayleigh Scattering of the Earth Atmosphere while photometric observations // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – Series “Fizika”. – V. 21(60). - №1. - P. 117-124.

A review of investigations on determination of the Rayleigh atmospheric optical depth has been made in the paper. It is shown that in calculations of the value of the Rayleigh scattering especially in the blue and ultraviolet spectral regions there exists an uncertainty. To redetermine theoretic formulae it is suggested to make accurate photometric observations in places with very high atmospheric transparency, for example, at the Antarctic station "Academician Vernadsky". The evaluation of possible errors in determining the Rayleigh optical depth of the atmosphere has been made with applying in calculations an average elevation of the observational site.

Key words: Rayleigh optical depth, accuracy of calculations, abnormally high transparency, atmospheric pressure.

Поступила в редакцію 05.11.2008 з.