

УДК 551.521.3

Об учете температуры и давления при определении релеевского рассеяния земной атмосферы

А.В. Козак¹, В.Г. Метлов², Г.А. Терез¹, Э.И. Терез³

¹ Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, 95007, Украина, Симферополь

² Крымская станция ГАИШ, 98409, Украина, Крым, Научный
v_metlov@sai.crimea.ua

³ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 29 января 2010 г.

Аннотация. Рассчитаны вариации релеевской оптической толщины от изменения давления и температуры для трех пунктов наблюдений: г. Симферополя ($\varphi = 44^\circ 57' N$, $\lambda = 34^\circ 8' E$, $h = 265$ м над уровнем моря), пос. Научного ($\varphi = 44^\circ 43' N$, $\lambda = 34^\circ 3' E$, $h = 583$ м) и метеостанции Ай-Петри ($\varphi = 44^\circ 24' N$, $\lambda = 34^\circ 6' E$, $h = 1180$ м).

ACCURATE DETERMINATIONS OF THE RAYLEIGH ATMOSPHERIC OPTICAL THICKNESS TAKING INTO CONSIDERATION CHANGING ATMOSPHERIC PRESSURE AND TEMPERATURE, by *A.V. Kozak, V.G. Metlov, G.A. Terez, E.I. Terez*. The pressure and temperature dependence of the rayleigh atmospheric optical thickness for three places: Simferopol ($\varphi = 44^\circ 57' N$, $\lambda = 34^\circ 8' E$, $h = 265$ m), Nauchny ($\varphi = 44^\circ 43' N$, $\lambda = 34^\circ 3' E$, $h = 583$ m) and Ay-Petry meteostation ($\varphi = 44^\circ 24' N$, $\lambda = 34^\circ 6' E$, $h = 1180$ m) are calculated.

Ключевые слова: релеевская оптическая толщина, атмосферное давление, температура

1 Введение

Впервые формулу, описывающую рассеяние света в воздухе, получил Дж. Релей (Rayleigh). Релей использовал представление о рассеивающей среде как о совокупности осцилляторов (которые он отождествлял с молекулами), обладающими тепловым движением. В этом случае величина рассеяния определяется по формуле

$$\tau_{\text{рел}} \sim \lambda^{-4}. \quad (1)$$

Впоследствии теория рассеяния развивалась и уточнялась. Л.И. Мандельштам в 1907 г. показал, что принципиальным условием для рассеяния света в сплошной среде является нарушение ее оптической однородности, при которой показатель преломления среды не постоянен, а меняется от точки к точке. Позже физик М. Смолуховский развил полную теорию рассеяния света разреженными газами, вызванными тепловыми флуктуациями (так называемое молекулярное рассеяние света). Он показал, что рассеивание происходит не на молекулах, а на оптических неоднородностях среды, вызванных флуктуациями плотности, которые в свою очередь возникают вследствие хаотического движения молекул. В общем случае 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. К тому же коэффициенты релеевского рассеяния должны зависеть от атмосферного давления и температуры.

Исследованию релеевского рассеяния посвящено большое количество исследований (Пендорф, 1957; Элтерман, 1964, 1968; Эдлен, 1953; Хойт, 1977; Лекнер, 1978; Фрёлх и Шоу, 1980; Янг, 1980; Кнейжис и др., 1980; Бейтс, 1984; Дас и Илбэл, 1984; Николет, 1984; Лейтерер и Шульц, 1986; Чен и др., 2001). Одно из последних – фундаментальная работа Бучольца (1995). В этой работе были заново пересмотрены результаты предыдущих работ и представлен согласованный набор новых величин для поперечных сечений релеевского рассеяния, коэффициентов абсолютного релеевского рассеяния, а также релеевских оптических толщин для диапазона длин волн 0.2–4 мк путем использования наилучших оценок индекса преломления и фактора деполяризации воздуха. Более того, в вычисления также вошла дисперсия фактора деполяризации в зависимости от длины волны. Однако следует отметить, что все теоретические расчеты (в том числе и исследование Бучольца) проводились для стандартной, изотермической атмосферы, для которой считается, что воздух сухой, содержащий 0.03 % CO₂ в единице объема при нормальном давлении 760 мм Hg (1013.25 мб) и температуре 15 °C.

2 Зависимость величины релеевского рассеяния от давления

Согласно теории Релея, количество рассеяния в объеме газа при данных условиях характеризуется объемным коэффициентом релеевского рассеяния β :

$$\beta(\lambda, h) = \sigma(\lambda) \cdot N(h), \quad (2)$$

где $\sigma(\lambda)$ – поперечное сечение рассеяния, рассчитанное на одну молекулу (в см²), $N(h)$ – число молекул (плотность) в 1 см³. При нормальных условиях ($t = +15$ °C, $P_o = 1013.25$ мбар) $N(h_o) = 2.687 \cdot 10^{19}$ см⁻³ (число Лосмидта). В формуле (2) $\beta(\lambda, h)$ выражено в обратных сантиметрах (см⁻¹).

Чтобы получить значение оптической толщины $\tau_{\text{рел}}$, обусловленной релеевским рассеянием при наблюдении с высоты h над уровнем моря, нужно проинтегрировать коэффициент объемного рассеяния $\beta(\lambda, h)$ по всей высоте атмосферного столба от высоты h до ∞ :

$$\tau_{\text{рел}}(\lambda, h) = \int_h^{\infty} \beta(\lambda, h) dh = \int_h^{\infty} \sigma(\lambda) \cdot N(h) dh. \quad (3)$$

Значения коэффициентов $\beta(\lambda)$ и $\sigma(\lambda)$ для стандартной атмосферы в интервале длин волн 0.2–4.0 мк приведены в работе Бучольца (1995).

В реальной атмосфере плотность воздуха убывает с высотой. Поэтому для учета изменения давления на высоте h при расчетах удобно использовать понятие однородной атмосферы, условной, у которой плотность воздуха в пределах всей атмосферы постоянна, а давление при ее основании равно давлению при основании соответствующего столба воздуха в реальной атмосфере. В этом случае поперечное сечение релеевского рассеяния принимается одинаковым по всей высоте, т. е. $\sigma(\lambda) = \text{const}$. Формула (3) принимает вид:

$$\tau_{\text{рел}}(\lambda, h) = \sigma(\lambda) \int_h^{\infty} N(h) dh. \quad (4)$$

Интеграл $\int_h^{\infty} N(h) dh$ равен общему числу молекул в столбе атмосферы от высоты h до ∞ . Отсюда $\int_h^{\infty} N(h) dh = N(h_o) \cdot H_h$, где H_h – высота однородной атмосферы, отсчитываемой от уровня h . В этом случае $H_h = H_o \cdot P/P_o$.

Для упрощения практических расчетов ряд авторов пытались найти эмпирическую формулу для определения величины релеевского рассеяния (при стандартной температуре 15 °C, но для разных высот h -пунктов наблюдений). Так, для области спектра 500 нм–1200 нм для релеевской оптической толщины Боргези и др. (1984) была предложена формула (5) на базе использования теории

Ми. Эта формула дает хорошие численные результаты (погрешность $\pm 0,1\%$) для аппроксимации экспериментальных наблюдений:

$$\tau_{\text{рел}} = 0.00879 \cdot \lambda^{-4.09} \cdot \frac{P}{P_0}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{рел}} = -\ln p$, где p – коэффициент прозрачности атмосферы, обусловленный релеевской компонентой. P – давление в данный момент в месте наблюдения, P_0 – давление на уровне моря, λ – длина волны в микронах.

В работе (Терез, 1990) на основании сравнения модельных расчетов и экспериментальных данных предложено для расчетов коэффициентов релеевского рассеяния в области спектра 300–500 нм использовать следующую формулу:

$$\tau_{\text{рел}} = \left[-2.022 + 2.654 \left(\frac{1}{\lambda} \right) - 1.186 \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 + 0.201 \left(\frac{1}{\lambda} \right)^3 \right] \cdot \frac{P}{P_0}. \quad (6)$$

Погрешность аппроксимации релеевской оптической толщины по формуле (6) 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).

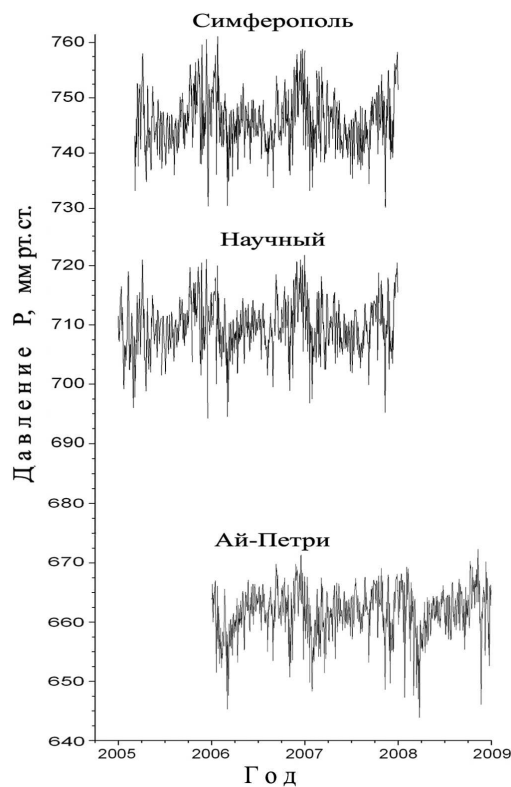


Рис. 1. Кривые изменения давления в Симферополе, Научном и Ай-Петри

Как видно из формул (5 и 6), релеевская оптическая толщина существенно зависит от атмосферного давления. По сложившейся практике при проведении расчетов давление определяется по барометрической формуле для данной высоты h места наблюдения. Но этого недостаточ-

но, т. к. атмосферное давление может меняться в зависимости от метеоусловий. На рис. 1 приведены кривые изменения давления на атмосферной станции в г. Симферополе ($\varphi = 44^\circ 57' N$, $\lambda = 34^\circ 8' E$, $h = 265$ m), пос. Научном ($\varphi = 44^\circ 43' N$, $\lambda = 34^\circ 3' E$, $h = 583$ m) и метеостанции Ай-Петри ($\varphi = 44^\circ 24' N$, $\lambda = 34^\circ 6' E$, $h = 1180$ m) за три года.

Таблица 1. Зависимость высоты однородной атмосферы H_0 от температуры t при $h_0 = 0$

H_0 (м)	7113	7552	7991	8430	8869
t°, C	-30	-15	0	+15	+30

Как видно из рис. 1, давление изменяется в течение года в пределах 31 мм. рт. ст. в Симферополе, 28 мм. рт. ст. в Научном и 26 мм. рт. ст. для станции Ай-Петри. Насколько сильно повлияют эти изменения на оптическую толщину релеевского рассеяния? На рис. 2 приведены отклонения от среднего значения $\tau_{\text{рел}}$ для минимальных и максимальных значений атмосферного давления.

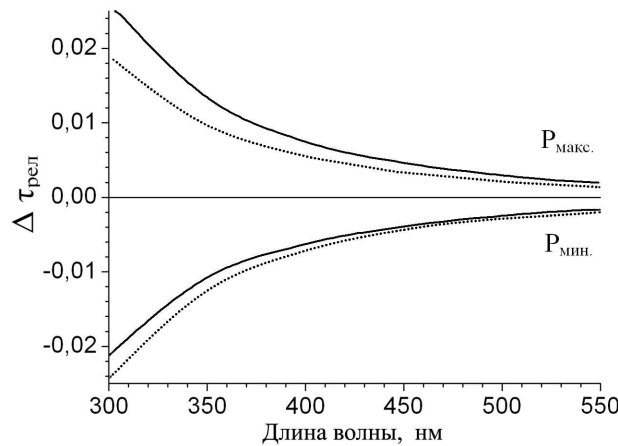


Рис. 2. Отклонения от среднего значения релеевской оптической толщины для минимальных и максимальных величин атмосферного давления в г. Симферополь (сплошные кривые) и на метеостанции Ай-Петри (пунктирные кривые)

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 $\tau_{\text{рел}}$, 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 атмосферы $\tau < 0.1$, необходимо при проведении фотометрических наблюдений регистрировать величину атмосферного давления.

3 Эффект температуры

Преобразуя уравнение состояния газа и барометрическую формулу, находим высоту однородной атмосферы на уровне моря (Матвеев, 1984):

$$H_0 = R \cdot T / g, \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – температура воздуха на высоте h в градусах Кельвина, g – ускорение силы тяжести. Как видно из формулы (7), высота однородной атмосферы на уровне моря заметно зависит от температуры (см. таблицу). В таблице приведены расчетные значения H_0 для разных температур.

На рис. 3. показаны возможные колебания температуры для Симферополя, Научного и Ай-Петри. Следует отметить, что температуры для Симферополя и Ай-Петри приведены по дневным измерениям (на 12 часов дня), а для Научного – среднесуточные.

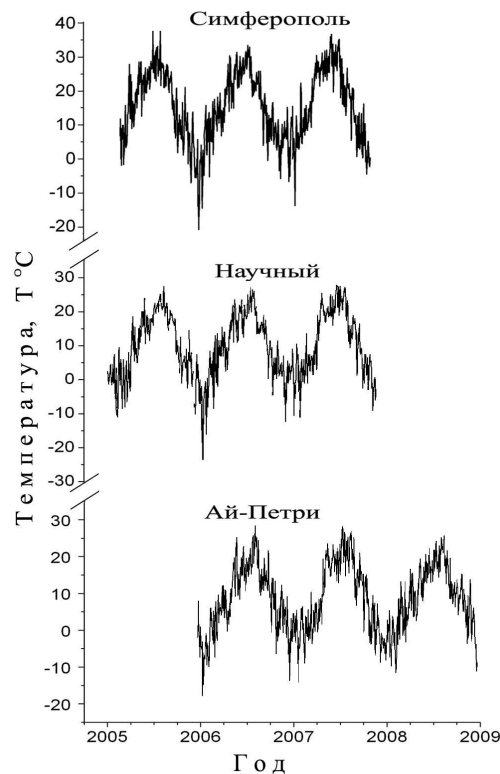


Рис. 3. Изменение температуры в Симферополе, Научном и Ай-Петри

Как видно из рис. 3., максимальная разница в зимних и летних температурах достигает 58°C для Симферополя, 50°C для Научного (реально несколько больше, т. к. для Научного приведены среднесуточные температуры) и 42°C для Ай-Петри. На рис. 4 показаны величины релеевской оптической толщины $\tau_{\text{рел}}$ для разных температур воздуха по отношению к величине $\tau_{\text{рел}}$ при температуре $t = 0^\circ\text{C}$.

На рис. 5 показана зависимость относительной погрешности определения $\tau_{\text{рел}}$ от температуры. Погрешность линейно зависит от температуры и не зависит от длины волны.

На рис. 6. показаны расчетные величины релеевской оптической толщины для Симферополя, Научного и Ай-Петри для длины волны 300 нм , если учитывать для каждого момента наблюдений изменения давления и температуры.

Как видно из рис. 6, погрешность определения релеевской оптической толщины без учета изменения давления и температуры (т. е. при использовании средних данных для каждого пункта наблюдений) при $\lambda = 300\text{ нм}$ порядка $\pm 0.07\text{--}0.08$. Для более длинных волн погрешность соответственно меньше.

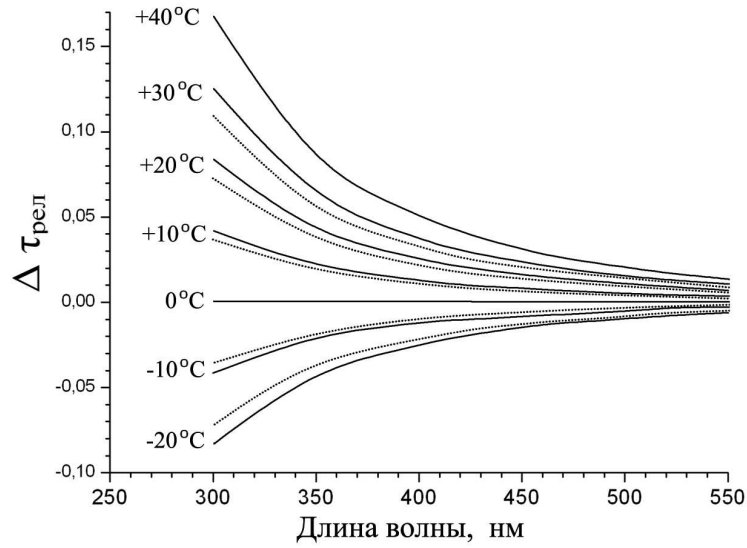


Рис. 4. Изменение релеевской оптической толщины по спектру при разных температурах воздуха по отношению $\tau_{\text{рел}}$ при температуре $t = 0^\circ\text{C}$. Сплошные кривые – Симферополь, пунктирные – Ай-Петри

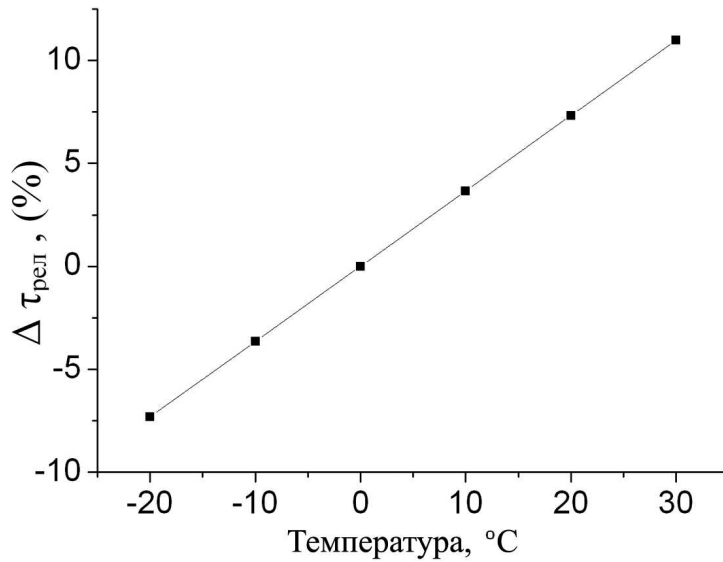


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности определения $\tau_{\text{рел}}$ от температуры

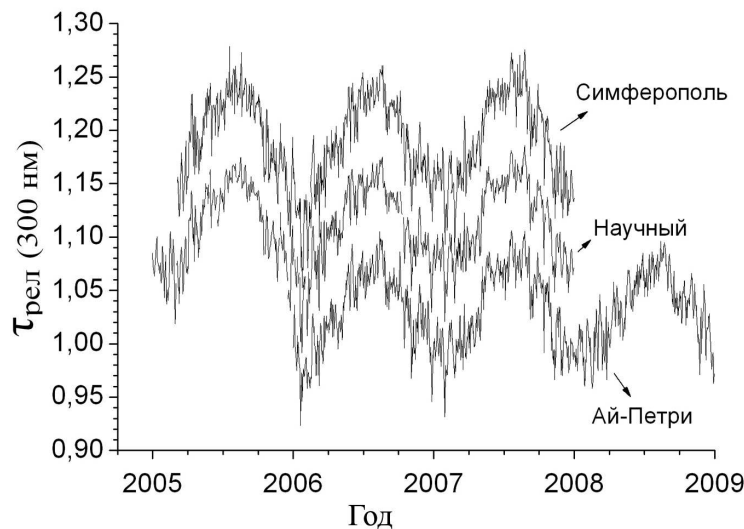


Рис. 6. Расчетные величины релеевской оптической толщины для Симферополя, Научного и Ай-Петри для длины волны 300 нм с учетом изменения давления и температуры для каждого момента наблюдений

4 Заключение

Одной из основных характеристик оптических свойств атмосферы является аэрозольная оптическая толщина $\tau_{\text{аэр}}(\lambda)$. Определить ее величину можно исходя из значений общей оптической толщины атмосферы $\tau(\lambda)$, получаемой непосредственно из фотометрических наблюдений, по формуле (вне молекулярных полос поглощения):

$$\tau_{\text{аэр}}(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_{\text{рел}}(\lambda). \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), точность определения аэрозольной оптической толщины зависит от точности измерения общей оптической толщины атмосферы $\tau(\lambda)$ и точности вычисления релеевской оптической толщины. Современные фотометрические наблюдения в местах с хорошим астроклиматом позволяют минимизировать погрешности измерений величин $\tau(\lambda)$ до 0.001–0.002. Поэтому основной вклад в ошибки определения аэрозольной оптической толщины 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 в Антарктике (Лейтерер, Сакунов, 1989), где общая оптическая толщина атмосферы $\tau(\lambda)$ порядка нескольких сотых. В условиях такой аномально высокой прозрачности неточность определения релеевской оптической толщины приводит к тому, что в синей и ультрафиолетовой областях спектра получают отрицательные величины аэрозольной оптической толщины (Ганн и др., 2001; Терез, 1995), что соответствует прозрачности атмосферы более 100 % и потому не имеет физического смысла. Примеров подобных наблюдений, выполненных и на Украине, и за рубежом, достаточно много. Так, в работе (Бурлов-Васильев и Васильева, 1992) 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 (Терез, 1995) было показано, что в этой работе были неверно вычислены значения релеевской оптической толщины. Отсюда и заниженные значения $\tau_{\text{аэр}}(\lambda)$.

Релеевская оптическая толщина зависит также от ускорения силы тяжести данного пункта наблюдений и влажности воздуха. Погрешности, возникающие вследствие изменения этих параметров, на порядок меньше, чем от вариации давления или температуры. Но тем не менее при самых

точных вычислениях значений релеевской оптической толщины необходимо учитывать и эти изменения.

Следует отметить, что определение точных величин релеевского рассеяния и, как следствие, аэрозольной оптической толщины атмосферы особенно важно для расчетов радиационного баланса Земли и построения достоверных климатических моделей.

Литература

- Бейтс (Bates D.R.) // Planet and Space Sci. 1984. V. 32. №. 6. P. 785.
- Боргези и др. (Borghesi A., Falcicchia G., Proverbio E., Qesada V.) // Circ. Star. Astron. in Carloforte Cagliari (Italy). 1984. №. 1. P. 1.
- Бурлов-Васильев К.А., Васильева И.Э. // Известия АН СССР. "Физика атмосферы и океана". 1992. Т. 28. №. 12. С. 1170.
- Бучольц (Bucholtz A.) // Appl. Optics. 1995. V. 34. №. 15. P. 2765.
- Дас и Икбал (Das A.K., Iqbal M.) // Rev. int. heliotechn. 1984. №. 2. P. 2.
- Кнейжис, Шеттл и др. (Kneizys F.X., Shettle E.P., et al.) // Air Force Geophys. Lab. Techn. Report. Bedford. Mass. 1980. V. 80. P. 0067.
- Лейтерер, Сакунов (Leiterer U., Sakunow G) // Zeit. Meteorol. 1989. V. 39. №. 6. P. 309.
- Лейтерер, Шульц (Leiterer U., Schulz K.-H.) // Gerlands Beitrage zur Geophysik. 1986. Bb. 93. V. 3. P. 262.
- Лекрен (Leckner B) // Solar energy. 1978. V. 20. P. 143.
- Матвеев Л.Т. // Курс общей метеорологии. 1984.
- Николет (Nicolet M) // Planet and Space Sci. 1984 V. 32. №. 11. P. 1467.
- Пендорф (Penndorf R.) // J. Opt. Soc. Am. 1957. V. 47. P. 176.
- Терез Г.А. // Известия АН СССР. "Физика атмосферы и океана". 1990. Т. 26. №. 5. С. 550.
- Терез Г.А. // Оптика и физика атмосферы. 1995. Т. 8. №. 10. С. 1545.
- Фрелих и Шоу (Frohlich C. and Shaw G.E.) // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 1773.
- Хойт (Hoyt D.V.) // J. Appl. Meteorol. 1977. V. 16. P. 432.
- Чен и др. (Ghan S., Laulainen N., Easter R., et al.) // J. Geoph. Research. 2001. V. 106. №. D6. P. 5295.
- Эдлен (Edlen B.) // J. Opt. Soc. Am. 1953. V. 43. P. 339.
- Элтерман (Elterman L.) // Environ. Res. Paper № 46. U. S. Air Force Cambridge Research Lab. Bedford. Mass. 1964. P. 57.
- Элтерман (Elterman L.) // Environ. Res. Paper № 285. U. S. Air Force Cambridge Research Lab. 1968. P. 59.
- Янг (Young A.T.) // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 3427.