

УДК 551.593.1

Оценка горизонтальной составляющей астрономической рефракции в эллипсоидальной атмосфере

М. Р. Федянин, Н. А. Василенко, В. А. Вольф

Приводится алгоритм вычисления вертикальной и горизонтальной составляющих астрономической рефракции для однородно-эллипсоидальной атмосферы Земли. Для атмосферного эллипсоида, параметры которого были определены по результатам измерений вертикальной составляющей вблизи горизонта, максимальное значение горизонтальной составляющей рефракции на зенитном расстоянии 88° оказалось равным $0.1''$. При этом реальная атмосфера аппроксимирована трехосным эллипсоидом, для которого максимальный наклон атмосферы в зените составил около $0.3'$.

ESTIMATION OF THE HORIZONTAL COMPONENT OF ASTRONOMICAL REFRACTION IN ELLIPSOIDAL ATMOSPHERE, by Fedyanin M. R., Vasilenko N. A., Volf V. A. — An algorithm of computation of vertical and horizontal components of astronomical refraction for homogeneous ellipsoidal Earth atmosphere is presented. For the atmosphere ellipsoid with parameters determined from the measurements of the vertical component near the horizon maximum value of the horizontal refraction component is $0.1''$ for the zenith distance 88° . The real atmosphere is approximated by three-axial ellipsoid with the atmosphere maximum slope about $0.3'$ at the zenith.

Цель данной работы — оценка влияния несферичности атмосферы Земли на величину горизонтальной составляющей астрономической рефракции, что, по мнению авторов, может быть учтено при разработке новой теории рефракции для слоисто-неоднородной эллипсоидальной атмосферы.

Горизонтальная составляющая астрономической рефракции (рефракционное смещение по азимуту, или азимутальная рефракция) свойственна реальной атмосфере и должна проявляться в астрономических наблюдениях, становясь заметной на больших зенитных расстояниях. При существующей точности астрометрических измерений оценить величину азимутальной рефракции из наблюдений весьма сложно.

В сферически-слоистой модели атмосферы, на которой основаны широко применяемые Пулковские таблицы рефракции, азимутальной рефракции нет. Теоретическую оценку горизонтальной составляющей рефракции можно выполнить, используя такую модель атмосферы, в которой наряду с рефракцией по зенитному расстоянию (вертикальная рефракция) имеется и азимутальная рефракция.

Для решения поставленной задачи использована модель атмосферы с постоянной плотностью. Достаточно полное представление о применении этой модели при изучении несферичности земной атмосферы можно составить по работам [4, 5].

В рамках однородной модели аппроксимируем верхнюю границу атмосферы трехосным эллипсоидом, причем считаем, что центр эллипсоидальной атмосферы совпадает с началом координат (начало координат — в центре Земли). Ось Z системы координат направим к северному полюсу мира, ось X — в точку весеннего равноденствия, ось Y будет дополнять систему координат до правой.

Трехосный эллипсоид в этой системе координат определяется шестью параметрами: тремя линейными, характеризующими размеры его полуосей (a, b, c), и тремя угловыми (ω, σ, τ). Здесь ω, σ — соответ-

ственно прямое восхождение и полярное расстояние оси z эллипсоида; τ — угол в плоскости Oxy между линией узлов и осью x , отсчитываемый от восходящего узла против часовой стрелки, если смотреть со стороны положительного направления оси z ($Oxyz$ — система координат, в которой уравнение трехосного эллипсоида имеет канонический вид).

В системе координат $OXYZ$ рассмотрим три прямые: I — прямую видимого направления на светило в эллипсоидальной атмосфере (проходит через точку наблюдения); II — нормаль к поверхности эллипсоида в точке преломления луча от светила; III — прямую истинного направления на светило (проходит через точку преломления). Обозначим через l_i, m_i, n_i ($i=1, 2, 3$) направляющие косинусы этих прямых.

Три прямые пересекаются в одной точке на поверхности атмосферного эллипсоида. Они должны быть, во-первых, компланарны и, во-вторых, удовлетворять закону Снеллиуса.

Представим алгоритм вычисления азимутальной рефракции, используя приведенные далее обозначения:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(\sin \omega \cos \tau + \cos \sigma \cos \omega \sin \tau)/a; \\ a_{21} &= (\sin \omega \sin \tau - \cos \sigma \cos \omega \cos \tau)/b; \\ a_{31} &= \sin \sigma \cos \omega/c; \\ a_{12} &= (\cos \omega \cos \tau - \cos \sigma \sin \omega \sin \tau)/a; \\ a_{22} &= -(\cos \omega \sin \tau + \cos \sigma \sin \omega \cos \tau)/b; \\ a_{32} &= \sin \sigma \sin \omega/c; \\ a_{13} &= \sin \sigma \sin \tau/a; \\ a_{23} &= \sin \sigma \cos \tau/b; \\ a_{33} &= \cos \sigma/c. \end{aligned} \quad (1)$$

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^3 a_{il}a_{lj}, \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X_T &= R_{\oplus} \cos \varphi \cos s; & m' &= X_T - Z_T \cos \alpha \operatorname{ctg} \delta; \\ Y_T &= R_{\oplus} \cos \varphi \sin s; & n' &= Y_T - Z_T \sin \alpha \operatorname{ctg} \delta; \\ Z_T &= R_{\oplus} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{ctg} \delta [(A_{11} \cos^2 \alpha + 2A_{12} \sin \alpha \cos \alpha + A_{22} \sin^2 \alpha) \operatorname{ctg} \delta + \\ &\quad + 2(A_{13} \cos \alpha + A_{23} \sin \alpha)] + A_{33}; \\ B &= \operatorname{ctg} \delta [m' A_{11} \cos \alpha + n' A_{22} \sin \alpha + A_{12} (m' \sin \alpha + n' \cos \alpha)] + \\ &\quad + m' A_{13} + n' A_{23}; \\ C &= (m')^2 A_{11} + (n')^2 A_{22} + 2m' n' A_{12} - 1; \\ Z_E &= \frac{1}{A} [\operatorname{sgn}(\delta) \sqrt{B^2 - AC} - B]; \quad Y_E = \sin \alpha \operatorname{ctg} \delta Z_E + n'; \end{aligned}$$

$$X_E = \cos \alpha \operatorname{ctg} \delta Z_E + m'. \quad (4)$$

$$\begin{cases} l_2(m_3n_1 - m_1n_3) + m_2(l_1n_3 - l_3n_1) + n_2(l_3m_1 - l_1m_3) = 0; \\ n \sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2} - (l_1l_2 + m_1m_2 + n_1n_2)^2 - \\ - \sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2} - (l_2l_3 + m_2m_3 + n_2n_3)^2 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

В формулах (3) — (6) приняты обозначения: n — показатель преломления воздуха в точке наблюдения, определяемый так, как описано в [4]; α, δ — видимые экваториальные координаты; α_n, δ_n — истинные координаты; s, φ, R_φ — местное звездное время, широта и расстояние точ-

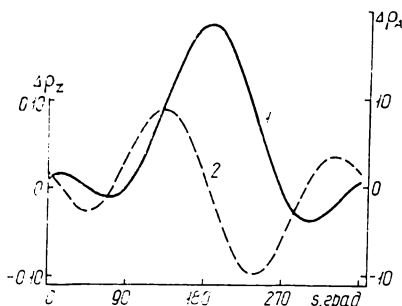


Рис. 1. Суточный ход аномалий рефракции (в угловых секундах) в меридиане ($z=88^\circ$): 1 — по z ; 2 — по A

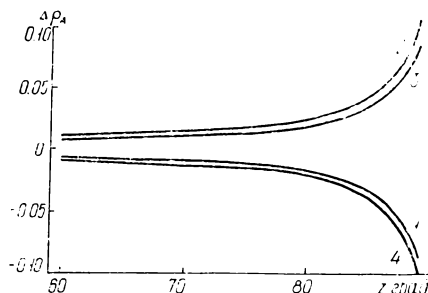


Рис. 2. Вертикальные разрезы атмосферы (значения $\Delta\rho_A$, угловые секунды). $s=240^\circ$; A , град: 1 — 45; 2 — 135; 3 — 225; 4 — 315

ки наблюдения от начала координат соответственно. Индекс E указывает на принадлежность к эллипсоидальной атмосфере, индекс S (см. далее) — к сферической атмосфере.

Запишем видимые экваториальные координаты светила:

$$\alpha = \alpha_n + \Delta\alpha, \quad \delta = \delta_n + \Delta\delta. \quad (7)$$

Переходя к горизонтальным координатам, вместо $\Delta\alpha, \Delta\delta$ получим $\Delta z, \Delta A$. Эти величины можно представить в виде

$$\Delta z = z_n - z_E = (z_n - z_S) + (z_S - z_E) = \rho_S + \Delta\rho_z, \quad \Delta A = A_E - A_n = \Delta\rho_A, \quad (8)$$

где $\Delta\rho_z$ и $\Delta\rho_A$ — аномалии рефракции по зенитному расстоянию и по азимуту (или просто азимутальная рефракция, так как рефракция по азимуту в сферической атмосфере отсутствует).

В (8) предполагалось, что в нашей модели реальную атмосферу отождествляем с эллипсоидальной атмосферой, а сферическую, на которой базируются Пулковские таблицы рефракции, — аппроксимируем сферической однородной моделью. Рефракция, вычисляемая по алгоритму, описывающему сферическую однородную атмосферу [4], достаточно хорошо согласуется с табличной рефракцией. Если характеризовать степень такого согласия средней квадратичной ошибкой, то она равна $0.94''$ (система из 102 уравнений, по которой определялись параметры атмосферного эллипсоида, охватывает диапазон зенитных расстояний $80-88.5^\circ$).

Итак, чтобы оценить величину азимутальной рефракции, необходимо решить систему двух трансцендентных уравнений (6) относительно двух неизвестных $\Delta\rho_z$ и $\Delta\rho_A$, к которым мы приходим в результате преобразований (7), (8). Разлагая в ряд тригонометрические функции, входящие в левые части (6), и сохраняя в них степени не выше второй относительно произведения малых величин $\Delta\rho_z$ и $\Delta\rho_A$, можно свести систему (6) к системе двух квадратных уравнений и найти искомые величины.

Для определения аномалий рефракции по зенитному расстоянию и азимуту необходимо знать шесть параметров, характеризующих атмо-

сферный эллипсоид. Эти параметры получены из решения системы уравнений с использованием реальных измерений астрономической рефракции на зенитных расстояниях $80-90^\circ$ [1]. Методика определения параметров эллипсоида описана в [4].

Приводим численные значения использованных параметров (по наблюдениям 9 — 11 октября 1968 г.):

$$\begin{aligned} a &= R_{\text{ср}} + 8018 \pm 10 \text{ м}, & R_{\text{ср}} &= 6\,367\,576 \text{ м}, \\ b &= R_{\text{э}} + 8103 \pm 25 \text{ м}, & \varphi &= 45.6^\circ, \\ c &= R_{\text{ср}} + 8601 \pm 60 \text{ м}, & t &= +3.1^\circ\text{C}, \\ \omega &= 187 \pm 3^\circ, & \bar{\lambda} &= 0.572 \text{ мкм}, \\ \sigma &= 65 \pm 6^\circ, & \bar{P} &= 9.8 \cdot 10^4 \text{ Па}, \\ \tau &= 19 \pm 26^\circ, & \bar{\pi} &= 4.5 \cdot 10^3 \text{ Па}. \end{aligned} \quad (9)$$

H_i — высота сферической однородной атмосферы, равная 8168 м. Для фиксированных значений азимута и зенитного расстояния вычислялись

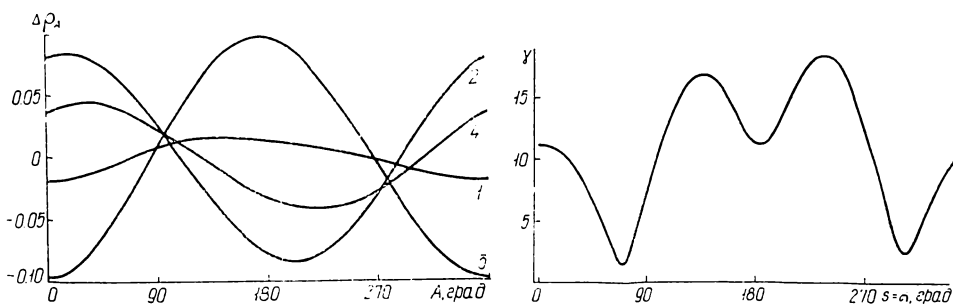


Рис. 3. Горизонтальные разрезы атмосферы (значения $\Delta\rho_A$, угловые секунды). $z=88^\circ$; s , град: 1 — 60; 2 — 150; 3 — 240; 4 — 330

Рис. 4. Полный угол между нормальными к сфере и эллипсоиду в зените места наблюдения ($s=\alpha$, $\delta=\varphi$)

$\Delta\rho_z$ и $\Delta\rho_A$ через 2^h звездного времени. По этим результатам построены графики (рисунки 1 — 3).

На рис. 1 показан суточный ход вычисленных аномалий рефракции по зенитному расстоянию и азимуту для $z=88^\circ$ в меридиане. Положению «наибольшая ось в меридиане, дневная часть неба» соответствует $s \approx 12^h$. Видно, что для атмосферного эллипсоида с отмеченными параметрами значение $\Delta\rho_A$ по абсолютной величине не превосходит $0.1''$. Знаки аномалий получаются в соответствии с формулами

$$\Delta\rho_z = z_S - z_E, \quad \Delta\rho_A = A_E - A_S; \quad A_S = A_H. \quad (10)$$

На рис. 2 приведен ход $\Delta\rho_A$ на больших z для четырех азимутов (через 90°). Звездное время фиксировано. На рис. 3 показан ход $\Delta\rho_A$ для $z=88^\circ$ с изменением азимута для четырех моментов звездного времени (через 6^h). Следует отметить, что для атмосферного эллипсоида с другими параметрами (для чего решается, естественно, другая система уравнений) $\Delta\rho_A$ может превышать $\pm 0.10''$ (для $z=88^\circ$). Но приведенное максимальное значение азимутальной рефракции можно считать характерным.

Изучению влияния наклона атмосферных слоев равной плотности на рефракцию посвящено много работ. Достаточно основательно на большом материале астрономических наблюдений изучен этот вопрос в работе [3].

В нашей задаче интересно оценить глобальный наклон атмосферы в зените. Причиной такого наклона всей толщи атмосферы (точнее, верхней границы модельной однородной атмосферы) является ее эллипсоидальность. Угол наклона атмосферы в зените определится как угол между нормальными к эллипсоиду и сфере, проходящей через точку пересечения отвесной линии с поверхностью эллипсоида. Угол между нормальными определится по формулам (1)–(4) и далее по следующим выражениям:

$$(l_2^2 + m_2^2 + n_2^2)^{1/2} = R_E, \quad (11)$$

$$\cos \alpha_X^E = l_2/R_E; \quad \cos \alpha_Y^E = m_2/R_E; \quad \cos \alpha_Z^E = n_2/R_E.$$

$$(X_E^2 + Y_E^2 + Z_E^2)^{1/2} = R_S, \quad (12)$$

$$\cos \alpha_X^S = X_E/R_S; \quad \cos \alpha_Y^S = Y_E/R_S; \quad \cos \alpha_Z^S = Z_E/R_S.$$

$$\cos \gamma = \cos \alpha_X^S \cos \alpha_X^E + \cos \alpha_Y^S \cos \alpha_Y^E + \cos \alpha_Z^S \cos \alpha_Z^E. \quad (13)$$

Угол наклона атмосферы в зените (γ) вычислялся с использованием прежних параметров (9). Знак «+» означает наклон атмосферы с юга на север. График изменения γ со временем приведен на рис. 4. Видно, что максимальное значение угла наклона атмосферы в зените для эллипсоида с приведенными выше численными значениями параметров составляет 18.5".

Легко показать, что наклон атмосферы на угол γ приводит к рефракционному смещению зенита на величину

$$\Delta \rho_{z=0} \approx (n - 1) \gamma \approx 2.8 \cdot 10^{-4} \gamma. \quad (14)$$

В [3] приведен годичный ход аномальной рефракции в плоскости меридиана. При вычислении наклонов воздушных слоев, вызывающих аномальную рефракцию, учтено 80 % атмосферного столба (между изобарическими поверхностями от $0.2 \cdot 10^5$ до $1.0 \cdot 10^5$ Па). Снимая с графика значения аномальной рефракции для соответствующего месяца и для тех обсерваторий, широты которых близки к используемой нами, после усреднения получим $\Delta \rho \approx -0.0048''$. Знак «—» (в соответствии с формулами М. С. Зверева [2]) указывает на положительное значение угла наклона, т. е. наклон с юга на север. В нашем случае, используя рис. 4 и формулу (14), найдем, что максимальное значение $\Delta \rho$ составляет примерно $0.0050''$. Согласно вполне удовлетворительное.

Таким образом, использование модели однородной атмосферы позволяет, по нашему мнению, сделать корректную оценку рефракционных свойств реальной атмосферы там, где инструментальными методами сделать это в настоящее время трудно или совсем невозможно.

1. *Василенко Н. А.* Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года // Астрометрия и астрофизика.— 1972.— Вып. 17.— С. 96—108.
2. *Зверев М. С.* К вопросу о вычислении рефракционных аномалий по данным аэрологических наблюдений // Астрон. журн.— 1946.— 23, вып. 2.— С. 97—110.
3. *Тютчев Г. С.* Исследование влияния наклонов атмосферных слоев равной плотности на определение широты места и точного времени по аэрологическим данным // Колебания широт и движения полюсов Земли. № 3. Широты и долготы.— М.: Наука, 1964.— С. 50—72.
4. *Федянин М. Р., Василенко Н. А.* Несферичность атмосферы по наблюдениям рефракции на больших зенитных расстояниях // Всесоюз. науч.-практ. совещ. по проблемам совершенствования аппаратных средств и таблиц для определения рефракции электромагнитных волн в земной атмосфере (Иркутск, июнь 1984 г.): Тез. докл.— Иркутск, 1984.— С. 107—110.
5. *Федянин М. Р., Морозов А. М.* Определение параметров атмосферного эллипсоида по измерениям рефракции на больших зенитных расстояниях // Всесоюз. совещ. по рефракции электромагнитных волн в атмосфере (Томск, 1983 г.): Тез. докл.— Томск: Томск. фил. Сиб. отд.-ния АН СССР, 1983.— С. 89—91.