

ЛИТЕРАТУРА

1. Дума Д. П., Кизюн Л. Н. Определение нуль-пунктов FK4 по вавингтонским меридианным наблюдениям малых планет Цереры, Паллады, Юноны и Весты за 1949—1971 гг. — Астрометрия и астрофизика, 1976, вып. 29, 15.
2. Сафронов Ю. И. Определение поправок равноденствия и экватора FK4 по вавингтонским меридианным наблюдениям больших планет за 1949—1971 гг. — Астрометрия и астрофизика, 1976, вып. 29, 9.
3. Adams A. N., Bestul S. M., Scott D. K. Results of observations made with the six-inch transit circle 1949—1956. — Publications of the United States Naval Observatory, 1964, **19**, 24.
4. Adams A. N., Scott D. K. Results of observations made with the six-inch transit circle 1956—1962. — Publications of the United States Naval Observatory, 1968, **19**, 318.
5. Adams A. N., Klock B. L., Scott D. K. Washington meridian observations of the Moon. Six-inch transit circle results 1925—1968. — Publications of the United States Naval Observatory, 1969, **19**, 446.
6. Adams A. N., Scott D. K. Observations of the Sun, Moon and Planets. Six-inch transit circle results. — United States Naval Observatory, Circ. NN 105, 108, 115, 124.
7. Buontempo M. E., Carey J. V., Eldridge P. Provisional Positions of the Sun, and Planets 1957—1971. — Royal Observatory Bulletin, 1973, **178**, 193, 226.
8. Klock B. L., Scott D. K. Observations of the Sun, Moon and Planets. Six-inch transit circle results. — United States Naval Observatory, Circ. NN 127, 136, 143.
9. Watts C. B., Scott F. P., Adams A. N. Results of observations made with the six-inch transit circle 1941—1949. — Publications of the United States Naval Observatory, 1952, **16**, 426.

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР

Поступила в редакцию
в июне 1975 г.

YU. I. SAFRONOV

USE OF WASHINGTON AND GREENWICH MERIDIAN OBSERVATIONS OF MERCURY, VENUS AND MARS FOR DETERMINATION OF ZERO-POINTS FOR FK4

Summary

The results are given of determination the right ascension and declination corrections for FK4 from Washington (1941—1971) and Greenwich (1957—1971) meridian observations of Mercury, Venus and Mars. The right ascension correction determined from the observations of different planets is $+0^{\circ}.025 \div 0^{\circ}.043$. The declination system for the Cooke Transit Circle at Herstmonceux needs correction by approximately $-0''.7$.

УДК 525.73

Н. А. Василенко, Т. Н. Харитонова

О ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В работах [4, 5] приводится теория предложенного В. И. Татарским метода вычисления углов рефракции в сферически-слоистой атмосфере для больших зенитных расстояний объекта ($80^{\circ} \leq \xi \leq 89^{\circ}$). Этот метод основан на использовании разложения показателя преломления n , входящего в интеграл рефракции, по системе ортонормированных функций φ_i . Функции φ_i являются собственными функциями корреляционной матрицы вертикального профиля n . Такой способ разложения обеспечивает быструю (достаточно ограничиться первыми двумя собственными функциями φ_i) и наилучшую сходимость ряда [3]. При этом

сам угол рефракции (см. рисунок) также имеет вид ряда по функциям φ_i

$$\psi_A = \langle \psi \rangle + a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2 + a_1^2 \psi_1^2 + \dots \quad (1)$$

Здесь $\langle \psi \rangle$ — значение ψ_A , зависящее от среднего профиля $\langle n \rangle$; ψ_i и коэффициенты a_i зависят от φ_i . Они выражаются также через профиль показателя преломления n . Оценки показывают, что при требуемой точности вычислений достаточно ограничиться линейными (относительно φ) членами. Такой способ представления угла рефракции позволяет заранее вычислить все величины, входящие в (1), за исключением коэффициентов a_i , которые вычисляются по простым формулам в каждом конкретном случае.

Для оценки точности предлагаемого метода вычислений были использованы величины рефракции, определенные из наблюдений Н. А. Василенко [1], а также вычисленные непосредственно методом численного интегрирования по данным специального зондирования атмосферы.

Опишем теперь подробнее все члены, входящие в (1).

$$\langle \psi \rangle = -\alpha \langle \varepsilon \rangle [1 + \beta \langle \varepsilon \rangle], \quad (2)$$

$$\text{где } \beta = \frac{\gamma \sin \xi [\gamma \cos \xi + (1 - \gamma^2 \sin^2 \xi)^{1/2}]}{2(1 - \gamma^2 \sin^2 \xi)^{1/2} [\gamma \cos \xi - (1 - \gamma^2 \sin^2 \xi)^{1/2}]},$$

$$\alpha = \frac{[1 - \gamma^2 \sin^2 \xi]^{1/2}}{\gamma \cos \xi - [1 - \gamma^2 \sin^2 \xi]^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{r_0 \sin \xi \cdot 10^{-4}}{2} \int_{r_0}^{r_0+H} \frac{r \langle Q(r) - Q_0 \rangle dr}{(r^2 - r_0^2 \sin^2 \xi)^{3/2}}. \quad (4)$$

Здесь $\gamma = \frac{r_0}{r_0 + H}$, r_0 — радиус Земли, H — высота объекта над поверхностью Земли, ξ — его видимое зенитное расстояние, r — текущая координата. Предполагается, что точка приема находится на поверхности Земли. Функция $Q(r)$ связана с индексом рефракции $N(r)$ соотношением

$$Q(r) = 2 \cdot 10^{-2} N(r), \quad (5)$$

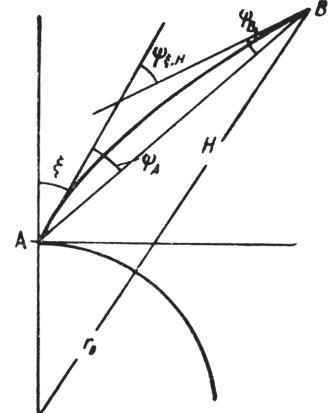
Q_0 — значение функции Q у поверхности Земли.

$$\psi_i = -\alpha \varepsilon_i [1 + 2\beta \langle \varepsilon \rangle]; \quad i = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где

$$\varepsilon_i = \frac{r_0 \sin \xi \cdot 10^{-4}}{2} \int_{r_0}^{r_0+H} \frac{r \varphi_i(r) dr}{(r^2 - r_0^2 \sin^2 \xi)^{3/2}}; \quad (7)$$

$$a_i = \sum_{k=1}^n \{[Q(r) - Q_0] - \langle Q(r) - Q_0 \rangle\} \varphi_i(r_k). \quad (8)$$



Суммирование в (8) производится по высотам r_k . Как отмечалось выше, величины $\langle \psi \rangle$, ψ_1 , ψ_2 были вычислены заранее. Интегралы (4), (7) вычислялись по методу Симпсона. Интегрирование в (7) велись до $H=27 \text{ км}$ (предполагалось, что на больших высотах функции $\varphi_i(r)$ обращаются в нуль), а в (4) — до $H=300 \text{ км}$. По данным зондирования атмосферы было найдено $\langle Q(r) - Q_0 \rangle$ до $H=27 \text{ км}$, далее брались данные для стандартной атмосферы [6]. Шаг h по высоте принимался равным 0,2 км (на участке 1—7 км), 1 км (7—27 км, 27—90 км), 2 км (90—120 км), 5 км (120—300 км). Шаг по ξ составлял 1° в диапазоне $80^\circ \leq \xi \leq 89^\circ$. Расчеты производились для длины волны $\lambda=0,7 \text{ мкм}$.

Для расчета коэффициентов $a_{1,2}$ по формуле (8) были использованы данные аэрологического зондирования, произведенного в моменты, близкие ко времени определений астрономической рефракции (в пределах одного часа) для 10 различных ночей. По ним определялась функция $Q(r) - Q_0$.

При сравнении вычисленных значений φ_A с наблюденными вводилась поправка за спектральный класс наблюдаемого объекта, влажность воздуха и разность высот пункта аэрологического зондирования и пункта наблюдений. Метод определения астрономической рефракции описан в работе [1]. Средние квадратичные ошибки σ одного определения для различных зенитных расстояний объекта такие:

$$\begin{array}{cccc} \xi & 80^\circ & 85^\circ & 88^\circ & 89^\circ \\ \sigma & 3.0 & 3.3 & 3.6 & 4.0 \end{array}$$

Разности наблюденных и вычисленных величин рефракции определялись за 10 ночей для каждого значения зенитного расстояния. В качестве «вычисленных» брались как полученные предлагаемым методом, так и рассчитанные в ГАО АН УССР методом численного интегрирования по данным зондирования атмосферы [1, 2]. Результаты сравнения приведены в таблице. Через ψ обозначены наблюденные значения, через ψ_{T1} — рассчитанные методом статистических ортогональных разложений, через ψ_{T2} — вычисленные в ГАО АН УССР, σ — среднее квадратичное значение отклонений отдельных разностей от среднего значения.

Разности и их отклонения	Зенитное расстояние									
	80°	81°	82°	83°	84°	85°	86°	87°	88°	89°
$\langle \Delta\psi_1 \rangle = \langle \psi - \psi_{T1} \rangle$	-1.0	-2.8	-2.2	-2.7	-2.1	-3.6	-7.1	-3.6	-5.1	-82.4
$\langle \Delta\psi_2 \rangle = \langle \psi - \psi_{T2} \rangle$	1.2	1.0	1.3	-1.4	-1.2	-1.7	-2.6	-4.8	-6.4	-7.7
σ_1	1.0	2.9	3.7	4.9	4.7	2.9	7.4	9.6	9.2	19.2
σ_2	1.4	3.0	2.2	3.1	3.9	5.8	6.4	6.6	9.0	10.4

Как видно из таблицы, метод статистических ортогональных разложений дает удовлетворительное согласие с результатами наблюдений для всех зенитных расстояний, за исключением $\xi=89^\circ$, хотя средние значения отклонений $\langle \Delta\psi_{T1} \rangle$ несколько больше, чем для $\langle \Delta\psi_{T2} \rangle$. Однако средние квадратичные ошибки для обоих методов практически совпадают.

Рассмотрим теперь возможные ошибки вычислений углов рефракции, считая все аэрологические данные точными. Остановимся сначала на ошибках численного интегрирования. Абсолютная погрешность фор-

мулы Симпсона, по которой вычислялись интегралы (4) и (7), для шага h оценивается соотношением

$$R \leq \frac{h(b-a)}{180} |f(x)|,$$

где b, a — соответственно верхний и нижний пределы интегрирования, $f(x)$ — подинтегральная функция. Оценки показывают, что на всех интервалах интегрирования значение R для максимального из членов разложения (1) $\langle\psi\rangle$ и угла $\xi=89^\circ$ составляет $2''.2$, т. е. суммарная максимальная ошибка для $\langle\psi\rangle, \psi_1, \psi_2$ не будет превышать $3''.8$. Погрешность вычисления подинтегральной функции в (4), (7) при условии, что величины задаются точно, составляет для трех членов $1''.0$. Таким образом, суммарная максимальная ошибка вычислений угла ψ (предполагаем, что коэффициенты a_i вычисляются точно) составляет $3''.9$, или примерно $0,3\%$. Из приведенных оценок видно, что для всех значений зенитных расстояний, за исключением $\xi=89^\circ$, средние значения отклонений ψ_1 от ψ находятся в пределах ошибок вычислений. В работе [2] приводится величина максимальной погрешности вычисления угла астрономической рефракции по аэрологическим данным, которые считаются точными. Для $\xi=88^\circ$ она составляет $3''.9$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный метод расчета рефракции дает удовлетворительное совпадение вычисленных и наблюденных значений астрономической рефракции до зенитного расстояния 88° включительно. При этом в каждом конкретном случае он требует значительно меньше времени для вычислений, так как сводится только к расчету коэффициентов a_i по формуле (8).

Авторы приносят благодарность В. И. Татарскому за постановку задачи и помочь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Н. А. О сезонных и суточных изменениях аномалий астрономической рефракции. — Астрометрия и астрофизика, 1975, вып. 25, 98.
2. Винникова Е. Б. Об оценке погрешности интегралов при вычислении рефракции света в земной атмосфере. — Астрометрия и астрофизика, 1974, вып. 27, 38.
3. Обухов А. М. О статистических ортогональных разложениях эмпирических функций. — Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1960, 3, 432.
4. Татарский В. И., Харитонова Т. Н. Применение ортогональных статистических разложений в теории атмосферной рефракции. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1974, 10, 996.
5. Харитонова Т. Н. Вычисление таблиц атмосферной рефракции при помощи статистических ортогональных разложений коэффициента преломления. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1974, 10, 1208.
6. U. S. Standard Atmosphere Supplements. Washington, 1966.

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР,
Институт физики
атмосферы АН СССР

Поступила в редакцию
в июле 1975 г.

N. A. VASILENKO, T. N. KHARITONOVA

ON THE ACCURACY OF ASTRONOMICAL REFRACTION
ANGLES OBTAINED BY THE METHOD
OF STATISTICAL ORTHOGONAL EXPANSION
OF REFRACTIVE INDEX

Summary

Estimation of the accuracy is given for a new method of calculating astronomical refraction at large zenith distances (80 — 89°). The method is based on statistical orthogonal expansion of the air refractive index. A comparison with the observational data shows a good agreement up to a zenith distance of 80° .