

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ ФОТОГРАФИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Определения астрономической рефракции из наблюдений звезд на больших зенитных расстояниях необходимы для оценки точности численных методов определения рефракции, основанных на использовании моделей атмосферы. Однако в последнее время наметилась возможность решения обратной задачи — определения метеопараметров атмосферы из измерений астрономической рефракции. Для решения этих задач требуется повышение точности наблюдений, что в первую очередь можно достичь, применяя объективные методы наблюдений. Несмотря на ряд преимуществ фотоэлектрического метода наблюдений, фотографический метод в полевых условиях проще и надежнее. Поэтому предпринята попытка применить для определения астрономической рефракции фотографический способ.

Наблюдения проводились инструментом АУ 2/2, снабженным фотографической насадкой [4] и с усовершенствованным хронорегистратором [5]. Хронорегистратор управляет работой секторного затвора, благодаря чему на фотопленке регистрируется след звезд в виде ряда коротких черточек. Посредством слабой засветки через объектив на негатив впечатывалось изображение креста нитей, расположенного в фокальной плоскости. Отсчеты вертикального круга и алидадного уровня производились обычным порядком, визуальным.

Аэрофотопленка Изопанхром, тип 29, позволяла получать пригодные для измерений снимки следов звезд на зенитных расстояниях до $88,5^\circ$ при масштабе снимка $85''$ в одном миллиметре. Величина места зенита M_z определялась по наблюдениям звезд на зенитных расстояниях от 30 до 60° , на востоке и на западе. Общий порядок наблюдений таков: три-четыре наблюдения одной звезды для определения M_z , серия наблюдений другой звезды для определения M_z и т. д. Перед началом наблюдений, а затем через каждые 2 ч по радиосигналам Службы времени и частоты определялась поправка хронорегистратора. Не реже чем через 30^m снимались отсчеты психрометра и не реже чем через час — отсчеты барометра-анероида.

Для удобства наблюдений прямо на стеклянную пластинку собственной сетки искателя наклеены дополнительные нити, которые образуют крест, указывающий центр кадра, а также его примерные границы. Точки пересечения граничных горизонтальных нитей с правой вертикальной нитью и кольцом задают позиционные углы ± 45 и $\pm 30^\circ$ соответственно (рис. 1). В эфемериды звезд включены значения их позиционных углов, благодаря чему следы звезд всегда проходили через центр кадра.

Обработку наблюдений производили методом, сходным с обычным методом обработки визуальных наблюдений. На каждом негативе измеряли координаты X_i , Y_i десяти точек следа звезды, из них пять выше горизонтальной нити и пять — ниже. Кроме того, измеряли координаты точки перекрестия нитей и двух точек на горизонтальной нити, в 5 мм слева и справа от перекрестья. Координаты точек следа звезды исправлялись за дисторсию оптической системы.

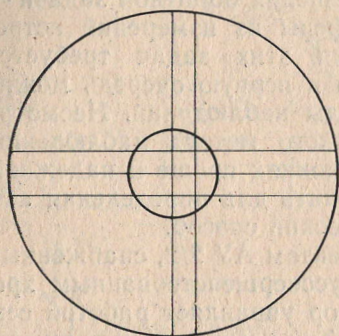


Рис. 1. Сетка нитей искателя.

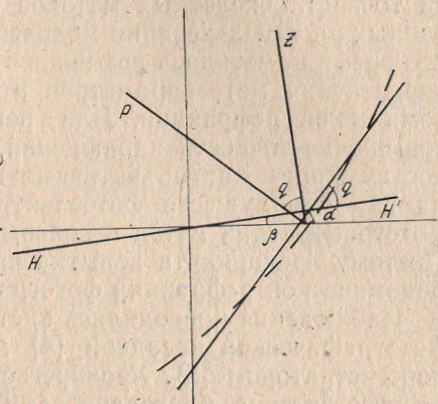


Рис. 2. Схема определения наклона горизонтальной нити.

Перед началом наблюдений горизонтальную нить по земному предмету устанавливали горизонтально, но точное значение ее наклона определяли по наблюдениям высоких звезд, параллельно с определением места зенита. В системе координат измерительного прибора находили уравнение прямой, проходящей через две точки на горизонтальной нити, затем методом наименьших квадратов — уравнение прямой, аппроксимирующей измеренный отрезок следа звезды. По угловым коэффициентам этих двух прямых определяли угол α между ними (рис. 2). С помощью несложных вычислений находили момент T_K , соответствующий точке пересечения следа с горизонтальной нитью, затем параллактический угол q и β — угол наклона горизонтальной нити. Значение угла β вычисляли по одному негативу со средней ошибкой $\sigma = \pm 7'$. За одну ночь проводили не менее шести определений, следовательно, среднее значение β_m получалось с ошибкой не более $\pm 3'$. Зная угол β , можно найти уравнение прямой HH' , проходящей через точку перекрестья и параллельной плоскости горизонта, а также определить расстояния L_i , $i = 1, 2, \dots, 10$ от каждой точки следа до этой прямой [1], причем для точек, расположенных выше и ниже HH' , знаки величин L_i различаются. Полагая $T_i = AL_i + T_H$ и решая полученную избыточную систему из 10 уравнений методом наименьших квадратов, получаем момент T_H пересечения следа звезды и линии HH' ($T = T_H$ при $L = 0$), отягощенный ошибкой за не-

равномерность движения звезды по высоте. Поправку за ускорение движения звезды по высоте вводили в зенитное расстояние $z_{\text{выч}}$, вычисленное на момент $T_{\text{н}}$. Поправку вычисляли по формуле

$$\Delta z = \frac{15^2}{2n\rho''} \frac{d^2 z}{dt^2} \Sigma (T_i - T_{\text{н}}),$$

где ρ'' — число секунд в радиане; $n=10$ — количество взятых в обработку точек следа звезды. Данная формула выводится аналогично известной формуле для вычисления поправки за ускорение движения звезды по высоте (например, [7]) с тем отличием, что, поскольку $T_{\text{н}} \neq T_{\text{ср}}$, величина

$$\Delta z = z_{\text{ср}} - z_{\text{выч}} - \frac{dz}{dt} (T_{\text{ср}} - T_{\text{н}}),$$

где

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \Sigma T_i; \quad z_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \Sigma z_{\text{выч}}(T_i).$$

Место зенита Mz находили по формуле

$$Mz = z_{\text{выч}} + \Delta z - \zeta + r,$$

где ζ — измеренное зенитное расстояние; r — рефракция, вычислявшаяся по формуле Лапласа

$$r = \alpha \operatorname{tg} \zeta \left[1 + \frac{\alpha (2 \cos^2 \zeta + 1)}{2 \cos^2 \zeta} - \frac{l}{R_+ \cos^2 \zeta} \right].$$

Здесь $\alpha = \frac{n^2 - 1}{2n^2}$; n — показатель преломления воздуха на уровне объектива инструмента; l — высота однородной атмосферы; P — давление в пункте наблюдения; g — ускорение свободного падения; $\rho = \frac{P}{RT}$ — плотность воздуха; R — удельная газовая постоянная; T — температура на уровне объектива инструмента, К; R_+ — местный радиус Земли.

По наблюдениям высоких звезд выводились средние за ночь значения Mz_m и β_m , а также среднее значение масштаба снимка M_m . Масштаб снимка определялся для каждого следа по формуле

$$M_i = \frac{15 (T_{i+1} - T_i) \cos \delta}{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, 9;$$

$$M = \frac{1}{9} \Sigma M_i.$$

При обработке снимков «рефракционных» звезд также определяли уравнение прямой, проходящей через две точки на горизонтальной нити, затем, используя значение β_m , — уравнение прямой NN' и для 10 точек следа величины L_i . Рефракцию

находили отдельно для каждой точки следа. Для этого вычисляли

$$\zeta_i = \zeta - Mz_m + S_i, \quad i = 1, 2, \dots, 10,$$

где $S_i = L_i M_m$.

Для каждого момента T_i рассчитывали зенитные расстояния z_i , а затем и рефракцию $r_i = z_i - \zeta_i$. Отсюда $r_m = z_m - \zeta_m$, где $r_m = \frac{1}{10} \Sigma r_i$, $z_m = \frac{1}{10} \Sigma z_i$, $\zeta_m = \frac{1}{10} \Sigma \zeta_i$. Строго говоря, $r_m \neq r(\zeta_m)$.

Численный эксперимент, проведенный с помощью Пулковских таблиц [6], показал: при $|S_i - S_{i0}| < 250''$ (что всегда выполнялось) на $\zeta = 88^\circ$ разность $r_m - r(\zeta_m) = 0,5''$. Как показано ниже, эта величина в пять раз меньше средней ошибки определения r_m и ζ_m .

Оценку точности наблюдений производили, исходя из следующих соображений. Если положение каждой точки следа по высоте определяется со средней ошибкой σ_S , то разности $D_i = S_i - S_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, 9$ характеризуются средней ошибкой $\sigma_D = \sqrt{2} \sigma_S$. Отсюда $\sigma_S = \sigma_D / \sqrt{2}$. Определение σ_S по значениям σ_D является не вполне строгим, так как количество D_i на единицу меньше количества S_i , но в данном случае это не приводит к заметным погрешностям.

Такая методика позволяет сделать оценку точности каждого негатива. Проведенный анализ показал, что полученные величины средних ошибок подчиняются закону

$$\sigma_S = a \sqrt{\sec \zeta} + b.$$

Ниже приведены значения величин a и b , полученные из серий наблюдений (по три ночи):

Дата и место наблюдений	a	b
1985, июль, Казахстан	0,40"	0,20"
1986, сентябрь, Томск	0,58	0,12
1986, ноябрь, Томск	1,03	-0,36
1987, сентябрь, Крым	0,51	-0,03

Наблюдения в Томске проводились с астростолба на крыше здания университета, отсюда и заметное различие между данными для сентября и ноября, поскольку ноябрьские наблюдения проводились после начала отопительного сезона при температуре до -18°C .

Чтобы сделать общую оценку точности наблюдений, примем точность одного отсчета вертикального круга $\pm 2''$, точность определения $Mz \pm 1''$. Тогда, используя, например, сентябрьские данные для Томска, получаем средние ошибки определения рефракции по одной точке снимка σ , а также ошибку σ_m средних значений ζ_m и r_m :

ζ	80°	85°	88°	89°	$89,8^\circ$
σ	2,7"	3,1"	3,9"	5,0"	10"
σ_m	2,3	2,3	2,4	2,6	3,8

Всего по описанной выше методике обработано 84 негатива «рефракционных» звезд и 54 — высоких. Величину M_z определяли со средней ошибкой $\pm 0,4 \dots 0,6''$. На рис. 3 для сравнения нанесены данные синхронных визуальных и фотографических наблюдений. Визуальные наблюдения приводились группой наблюдателей из Львовского политехнического института с помощью теодолита ОТ-02 на 10 постоянных нитях методом

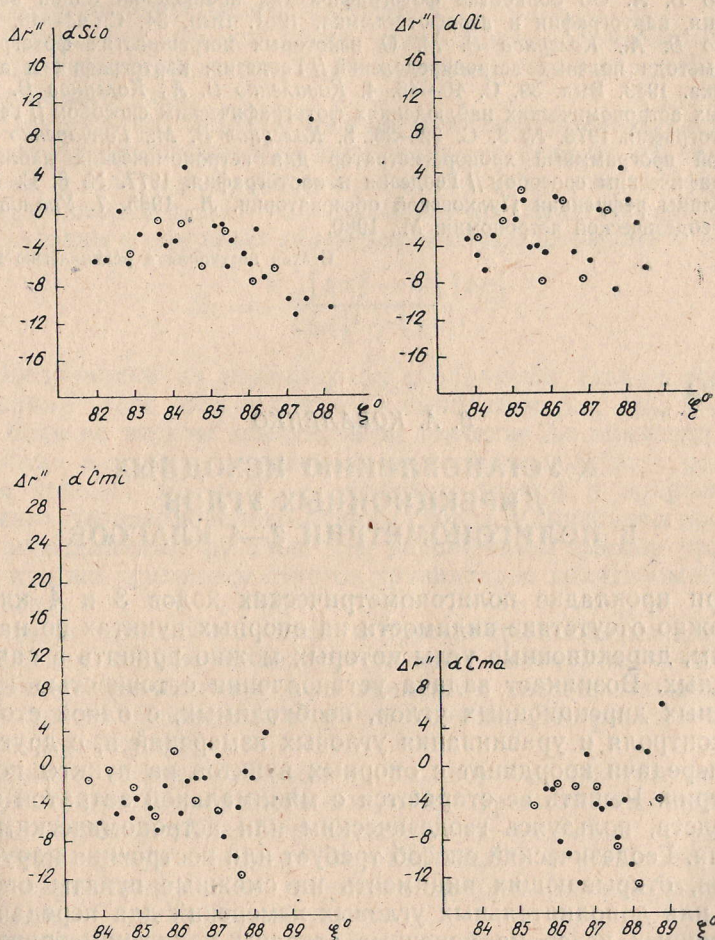


Рис. 3. Сравнение результатов синхронных фотографических и визуальных определений рефракции 3—4. 09. 87 г.

○ — фотографические наблюдения; · — визуальные наблюдения.

«глаз—клавиша». Место зенита находили по земному предмету.

На графике нанесены величины $\Delta r = r_m - r_{PU}$, где r_{PU} — рефракция, вычисленная по Пулковским таблицам [6].

Анализ результатов наблюдений показывает, что фотографический метод наблюдений с успехом можно применить для

определений астрономической рефракции. По сравнению с визуальным способом его несомненные достоинства — объективность и большая точность. Недостатки — трудоемкость обработки и несколько меньшая светочувствительность (с данным инструментом и данным фотоматериалом).

1. *Выгодский М. Я.* Справочник по высшей математике. М., 1966. 2. *Коваленко В. А.* Об обработке фотографических наблюдений одной звезды // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1981. Вып. 34. С. 43—48. 3. *Коваленко В. А., Колгунов В. М.* О некоторых погрешностях фотографического метода полевых астроопределений // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1983. Вып. 38. С. 40—46. 4. *Коваленко В. А., Колгунов В. М.* Об опытных астрономических наблюдениях фотографическим способом // Геодезия и картография. 1976. № 3. С. 22—26. 5. *Колгунов В. М., Гончаренко Ю. Я.* Полевой программный хронорегистратор для астрономических наблюдений фотографическим способом // Геодезия и картография. 1977. № 8. С. 13—17. 6. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. Л., 1985. 7. *Уралов С. С.* Курс геодезической астрономии. М., 1980.