

В. В. КИРИЧУК

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ РЕФРАКЦИЯ И АНОМАЛИИ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ НА БОЛЬШИХ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЯХ ($z=88, 89, 90^\circ$)

Если в момент времени S измерить видимое зенитное расстояние светила z и вычислить его истинное зенитное расстояние z_0 по часовому углу светила t , то астрономическая рефракция может быть определена из выражения

$$\rho = z_0 - z. \quad (1)$$

Измерив же в момент наблюдений температуру и давление воздуха на высоте инструмента, можно получить значение астрономической рефракции ρ_0 для данного зенитного расстояния по таблицам рефракции (например, по «Таблицам рефракции Пулковской ГАО»).

На больших зенитных расстояниях часто наблюдается аномалия астрономической рефракции, то есть расхождение табличного и действительного значений астрономической рефракции. Это явление может быть представлено следующим выражением:

$$\rho - \rho_0 = \Delta\rho, \quad (2)$$

где $\Delta\rho$ — отклонение действительного значения рефракции, вычисленного по формуле (1), от табличного и есть аномалия астрономической рефракции.

О существовании подобных аномалий астрономам было известно давно. По оценке Ф. Бесселя, для зенитного расстояния $89,5^\circ$ величина $\Delta\rho$ может достигать $\pm 20''$. В настоящее время вопрос аномалий астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях приобретает особо важное значение в связи с наблюдениями искусственных спутников Земли в целях построения глобальных опорных сетей методами космической геодезии.

Нами была поставлена задача исследовать влияние геодезической рефракции на аномалии астрономической рефракции при наблюдениях небесного светила (Солнца) на зенитных расстояниях $88, 89, 90^\circ$. С этой целью на протяжении летних сезонов 1967—1968 гг. мы организовали работы по наблюдениям Солнца для получения величины $\Delta\rho$ и земного предмета (пункта триангуляции) — для получения значений геодезической рефракции γ .

Геодезическая рефракция определялась из измерений зенитных расстояний пунктов триангуляции, лежащих на краю видимого горизонта в створе с направлением инструмент—светило. Практически, учитывая, что при однородной подстилающей поверхности изменения коэффициента геодезической рефракции по азимуту незначительны, допускались от-

клонения от указанного створа $\pm 10^\circ$. Инструмент устанавливался на пунктах триангуляции с известными астрономическими координатами (ошибка определения долготы $\pm 0,03''$; ошибка определения широты $\pm 0,3''$). Расстояние между пунктами наблюдений и пунктами визирования и средние высоты визирного луча соответственно были: в 1967 г. — 5977,16 и 25,4 м; в 1968 г. — 10118,85 и 17,0 м.

Наблюдения производились по следующей программе:

1. Измерение зенитного расстояния земного предмета (четыре приема).
2. Наблюдение Солнца при двух кругах с отсчетами вертикального круга и хронометра на зенитном расстоянии 88° .
3. Измерение зенитного расстояния земного предмета (четыре приема).
4. Наблюдение Солнца на зенитном расстоянии 89° .
5. Измерение зенитного расстояния земного предмета (четыре приема).
6. Наблюдение Солнца на зенитном расстоянии 90° .
7. Измерение зенитного расстояния земного предмета (четыре приема).

Все наблюдения Солнца и земного предмета сопровождалось измерениями температуры и давления воздуха с помощью термометров и барометров — анероидов. В начале и конце программы на хронометр принимались сигналы времени. Для наблюдений использовались оптические теодолиты ОТ-02 и средние морские хронометры. Фиксация моментов прохождений Солнца через заданный альмукантарат осуществлялась способом глаз—ухо.

Результаты измерений характеризуются следующими ошибками:

1. Средняя квадратическая ошибка измерения зенитных расстояний, выведенная по уклонениям места зенита между приемами

$$m_1 = \pm 1,09''.$$

2. Средняя квадратическая ошибка определения истинных зенитных расстояний Солнца по его часовому углу

$$m_2 = \pm \sqrt{m_\varphi^2 \cos^2 A + m_t^2 \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 A} = \pm 2,0'', \quad (3)$$

где m_φ — средняя квадратическая ошибка широты места наблюдения, m_t — средняя квадратическая ошибка часового угла Солнца, учитывающая ошибку долготы места наблюдений и случайные ошибки фиксации времени.

3. Средняя квадратическая ошибка вычисления табличной рефракции с учетом ошибок измерения температуры и давления воздуха

$$\pm 2'' \leq m_{p_0} \leq \pm 6''.$$

В результате проведенных экспериментальных наблюдений для каждого из выбранных зенитных расстояний небесного светила (88° , 89° , 90°) получено в среднем по 65 пар значений величин $\Delta\rho$ и r . В табл. 1 приведены средние значения указанных величин для каждого сезона.

Анализируя данные табл. 1, легко заметить, что для всех трех исследуемых зенитных расстояний справедливы следующие приближенные равенства:

$$\Delta\rho_{1967} \cong \frac{1}{2} \Delta\rho_{1968}, \quad r_{1967} \cong \frac{1}{2} r_{1968}. \quad (4)$$

Другими словами, увеличению геодезической рефракции почти вдвое во время наблюдений 1968 г. (наблюдения производились с астро- столба высотой 1,6 м) по отношению к ее величине в 1967 г. (наблюдения производились со столика сигнала высотой 6,2 м) соответствует увеличение почти в два раза абсолютной величины аномалии астроно- мической рефракции 1968 г. по отношению к величине ее, полученной в 1967 году. На основании соотношений (4) нами сделано предположе- ние о существовании прямой линейной зависимости между аномалиями астрономической рефракции и величиной геодезической рефракции в направлении инструмент—светило.

Таблица 1

Значения $\Delta\rho$ и r^*

Год	z°	$\Delta\rho''$	r^*	$t^\circ C$	$B, \text{ м.м.}$
1967	88	-15,0	+25,0	+19,8	738
	89	-32,5	+25,0		
	90	-52,5	+27,0		
1968	88	-33,1	+50,0	+12,7	735
	89	-72,5	+62,5		
	90	-95,0	+62,5		

Для выяснения характера этой связи результаты наблюдений 1967 и 1968 гг., то есть соответственные ряды значений аномалий астроно- мической рефракции и значений геодезической рефракции для каждого из трех исследуемых зенитных расстояний, были обработаны методами корреляционного анализа (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции (k) и вид уравнений корреляционной зависимости между аномалиями астрономической рефракции и величиной геодезической рефракции

Год	z°	k	Вид уравнения
1967	88	$+0,80 \pm 0,05$	$\Delta\rho'' = -0,864 \cdot r'' + 7,04''$
	89	$+0,82 \pm 0,06$	$\Delta\rho'' = -0,667 \cdot r'' - 25,36''$
	90	$+0,90 \pm 0,04$	$\Delta\rho'' = -2,017 \cdot r'' - 3,79''$
1968	88	$+0,88 \pm 0,03$	$\Delta\rho'' = -1,402 \cdot r'' + 47,10''$
	89	$+0,88 \pm 0,04$	$\Delta\rho'' = -0,683 \cdot r'' - 29,81''$
	90	$+1,0 \pm 0,08$	$\Delta\rho'' = -1,333 \cdot r'' - 11,69''$
1967—1968	88*	$+0,76 \pm 0,08$	$\Delta\rho'' = -0,763 \cdot r'' + 2,90''$
	89	$+0,86 \pm 0,10$	$\Delta\rho'' = -0,720 \cdot r'' - 29,64''$
	90	$+0,90 \pm 0,10$	$\Delta\rho'' = 0,930 \cdot r'' - 30,12''$

* Совместная обработка результатов наблюдений.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Между величиной геодезической рефракции, вычисленной по створу с направлением инструмент—светило в момент наблюдения све- тила, и аномалией астрономической рефракции, определяемой из вы- ражения (2) по наблюдениям этого светила на больших зенитных рас- стояниях ($z=88, 89, 90^\circ$), существует надежная линейная корреляцион- ная зависимость ($+0,75 \leq k \leq +1,00$).

2. С увеличением зенитного расстояния коэффициент корреляции также возрастает, а следовательно, возрастает влияние геодезической рефракции на величину аномалии астрономической рефракции. Дадим физическую интерпретацию полученных выводов.

Как известно, аномалии астрономической рефракции возникают в случае, когда поверхности равных значений коэффициента преломления (так называемые изодиоптрические поверхности) отличаются от сферических и центр их не совпадает с центром Земли. Причиной этого может являться наклон изодиоптрических поверхностей к плоскости горизонта точки наблюдений. Примем для упрощения, что атмосфера Земли — это ряд плоско-параллельных изодиоптрических поверхностей, наклоненных к горизонту точки наблюдений под некоторым углом α . Последний будем считать положительным, если нормаль к изодиоптрической поверхности отклоняется от нормали к горизонту в точке наблюдений вправо по ходу часовой стрелки (рис. 1). Тогда известная формула

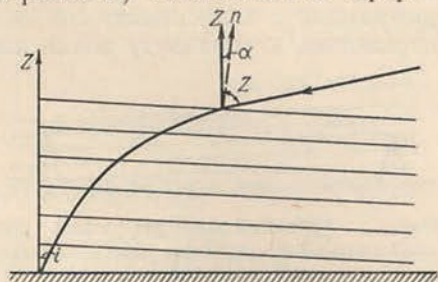


Рис. 1. Влияние наклона изодиоптрических поверхностей на вычисление астрономической рефракции.

$$\frac{\sin i}{\sin z} = \frac{\sin(z + \rho)}{\sin z} = 1 + k\delta_0 \quad (5)$$

примет вид
$$\frac{\sin(i - \alpha)}{\sin z} = \frac{\sin(z + \rho - \alpha)}{\sin z} = 1 + k\delta_0, \quad (6)$$

откуда после преобразований получаем выражение, позволяющее вычислять астрономическую рефракцию с учетом величины наклона изодиоптрических поверхностей

$$\rho = \frac{k\delta_0}{\sin 1''} \operatorname{tg} z - \frac{k\delta_0}{\sin 1''} \sec^2 z \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

где первый член в правой части есть приближенная формула астрономической рефракции для $z \leq 45^\circ$ (табличная рефракция), а второй представляет собой поправку в табличную рефракцию за наклон изодиоптрических поверхностей.

Для отрицательных значений угла наклона α в формуле (7) необходимо изменить знак поправочного члена на обратный. Таким образом, можно утверждать, что при $\alpha > 0$ табличное значение астрономической рефракции больше действительного, то есть имеет место отрицательная аномалия астрономической рефракции. При $\alpha < 0$ табличное значение меньше действительного, то есть имеет место положительная аномалия астрономической рефракции.

С другой стороны, геодезическая рефракция также может быть представлена как следствие наклона изодиоптрических поверхностей в приземном слое воздуха. Действительно, возьмем простейший случай, изображенный на рис. 2.

Между двумя пунктами (1, 2) горизонтальная однородная подстилающая поверхность; высота визирного луча на всем пути одинакова (луч параллелен горизонту). Но плотности воздуха на пунктах не равны, причем $\delta_1 > \delta_2$. А это значит, что слой одинаковой плотности, а следовательно, и изодиоптрические поверхности наклонены к горизонту. На рис. 2 угол наклона изодиоптрических поверхностей к горизонту, по

нашему определению, положительный. В данном случае световая кривая направлена выпуклостью вверх и, значит, геодезическая рефракция положительна ($r > 0$).

Если рассмотреть пример отрицательного наклона изодиоптрических поверхностей, то есть случай, когда $\delta_1 < \delta_2$ (рис. 3), то, очевидно, геодезическая рефракция будет отрицательная ($r < 0$).

Сопоставив это с выводами о знаках аномалий астрономической рефракции в зависимости от знака угла наклона изодиоптрических поверхностей к горизонту точки наблюдения, можно заключить, что ано-

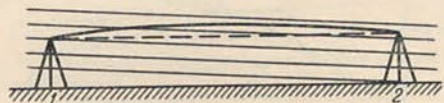


Рис. 2. Геодезическая рефракция при положительном наклоне изодиоптрических поверхностей.

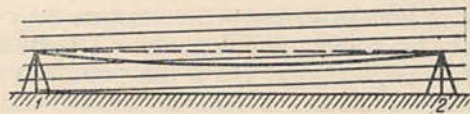


Рис. 3. Геодезическая рефракция при отрицательном наклоне изодиоптрических поверхностей.

малии астрономической рефракции по знаку должны быть противоположны геодезической рефракции, обусловленной наклоном изодиоптрических поверхностей в створе с направлением инструмент—светило.

Эти выводы до некоторой степени могут служить объяснением полученных нами уравнений корреляционной зависимости между величинами $\Delta\rho$ и r .

Итак, во время наблюдений небесных светил визирный луч (инструмент—светило) на значительном участке пути проходит в приземном слое воздуха и подвергается влиянию сложных физических процессов, происходящих в этом слое. Закономерности этих процессов крайне отличаются от закономерностей, описывающих состояние так называемой «нормальной» атмосферы, на основании которых производится вычисление и составление таблиц астрономической рефракции.

Наиболее полной характеристикой пути визирного луча в приземном слое воздуха является величина геодезической рефракции, определенной по направлению инструмент—светило. Поэтому представляется правомерным исследование зависимости аномалий астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях от величины указанной геодезической рефракции, что и проделано в настоящей работе.

Формулы корреляционной зависимости между аномалиями $\Delta\rho$ и величиной геодезической рефракции r , полученные после обработки экспериментальных данных, хорошо согласуются с теоретическими выводами о характере связи между рассматриваемыми величинами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев М. С. К вопросу о вычислении рефракционных аномалий по данным аэрологических наблюдений. АЖ, 23, 2, 1946.
2. Колчинский И. Г. Рефракция света в земной атмосфере. «Наукова думка», Киев, 1967.
3. Нейман Ю. Вводный курс теории вероятностей и математической статистики (перевод с англ.). «Наука», М., 1968.
4. Фесенков В. Г. Определение рефракции при больших зенитных расстояниях из наблюдений Солнца при помощи секстана. Русский астрономический журнал, 4, 1, 1927.

Работа поступила
10 ноября 1969 года