

УДК 528.28

В. В. КИРИЧУК, Н. Н. ОЛЕИНICK

**ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АСИММЕТРИИ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ
ВБЛИЗИ ГОРИЗОНТА**

При построении любой теории астрономической рефракции постулируется симметрия рефракции относительно зенита в любом направлении небесной сферы. При этом исходят из представления об атмосфере как о среде с симметричными физиче-

скими характеристиками состояния относительно зенита места наблюдения.

Анализ аэрологических исследований атмосферного воздуха на различных высотах указывает на несоответствие реальной атмосфера такому представлению, и, как следствие этого, на возможность зависимости величины рефракции на фиксированном зенитном расстоянии от азимута наблюдения.

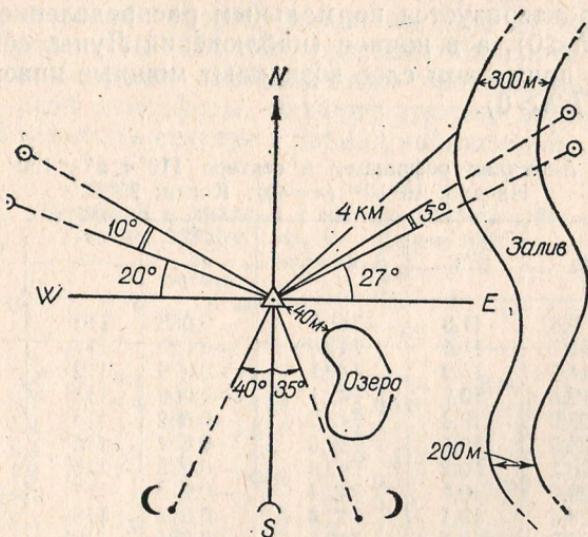


Рис. 1. Схема наблюдений:
○ — наблюдения Солнца; ⚡ — наблюдения Луны.

В 1973 г. в северных широтах ($\phi \approx 69^\circ N$) мы поставили эксперимент по определению величины изменения рефракции вблизи горизонта в зависимости от азимута наблюдений. Близгоризонтную зону выбрали, исходя из того, что изменяемость величины рефракции на фиксированном зенитном расстоянии в зависимости от азимута, как и всякое аномальное явление в рефракции, очевидно, будет тем больше, чем больше зенитное расстояние. А значит, тем больше будет вероятность обнаружения этого явления инструментальным методом. Аномалии рефракции определяли по наблюдениям зенитных расстояний Солнца и Луны по известной методике [1, 3]. Выбор Солнца и Луны в качестве объектов наблюдения позволил получить непрерывный ряд значений аномалий в зоне $81^\circ < z < 87^\circ$ в различных направлениях по азимуту. Определения аномалий рефракции сопровождались синхронными измерениями метеопараметров приземного слоя воздуха на высоте инструмента: силы и направления ветра, температуры и давления, а также градиента температуры. Наблюдения выполнялись непрерывно с 19^h10^m 13. VIII. 73 г. до 5^h20^m 14. VIII. 73 г.* На рис. 1 представлена схема расположения пункта наблюдения и секторов наблюдения Солнца и Луны.

* Время местное.

На основании данных табл. 1—4 можно сделать выводы:

1. Метеоусловия в пункте наблюдений изменялись незначительно (давление — на 4 мм рт. ст., температура — на 6°C , скорость и направление ветра — практически постоянны). Исключение составляет изменение градиента температуры воздуха, что вполне закономерно: в дневное время (наблюдения Солнца, секторы $110^{\circ} < a < 120^{\circ}$ и $238^{\circ} < a < 243^{\circ}$) приземный слой воздуха характеризуется нормальным распределением температуры ($dT/dh < 0$), а в ночное (наблюдения Луны, сектор $325^{\circ} < a < 40^{\circ}$) в приземном слое возникают мощные инверсии температуры ($dT/dh > 0$).

Таблица 1

Аномалии рефракции в секторе $110^{\circ} < a^* < 120^{\circ}$

Начало: $19^{\text{h}}10^{\text{m}}$ ($n=40$). Конец: $20^{\text{h}}50^{\text{m}}$

z	$\Delta\rho$	$t, {}^{\circ}\text{C}$	$B, \text{мм рт.ст.}$	$\frac{dT}{dh},$ град/м	a	Сила и направ- ление ветра
81,5°	— 9,8"	11,3	741,9	- 0,083	110°	2,1 W
82,0	—11,7	11,1	741,9	- 0,080	111	"
82,5	14,5	10,9	742,1	- 0,079	112	"
83,0	—19,8	10,7	742,1	- 0,069	113	
83,5	—23,0	10,4	742,2	- 0,962	114	1,7" W
84,0	—25,0	10,4	742,3	- 0,054	115	"
84,5	—20,1	10,2	742,4	- 0,025	116	"
85,0	—29,0	10,1	742,4	- 0,013	117	
85,5	—28,4	10,1	742,4	- 0,017	118	2,4" W
86,0	—27,3	9,7	742,6	+ 0,021	119	
86,5	—31,4	9,6	742,7	+ 0,013	120	2,9" W

* Здесь и везде азимут a отсчитан от точки юга.

Таблица 2

Аномалии рефракции в секторе $238^{\circ} < a < 243^{\circ}$

Начало: $4^{\text{h}}06^{\text{m}}$ ($n=22$). Конец: $5^{\text{h}}20^{\text{m}}$

z	$\Delta\rho$	$t, {}^{\circ}\text{C}$	$B, \text{мм рт.ст.}$	$\frac{dT}{dh},$ град/м	a	Сила и направ- ление ветра
84,5°	+ 9,8"	7,4	745,6	- 0,079	243°	1,8 W
85,0	- 2,7	7,2	745,7	- 0,061	242	"
85,5	- 4,3	7,0	745,8	- 0,047	241	
86,0	- 3,6	6,6	746,0	- 0,005	240	2,1" W
86,5	- 4,4	6,5	746,1	+ 0,013	238	2,5 SW

2. Значения аномалий рефракции в исследуемом диапазоне зенитных расстояний по каждому из секторов наблюдений хорошо согласуются с выполненными ранее исследованиями [1, 2, 4] и имеют тенденцию возрастания по абсолютной величине при увеличении зенитного расстояния. Но здесь необходимо отметить, что в южной части небесной сферы (табл. 3, 4) эта тенденция несколько нарушается. Аномалии рефракции возрастают по абсолютной величине в диапазоне $81,5^{\circ} \leq z \leq 84,5^{\circ}$, достигая максимума при $z = 84,5^{\circ}$. Затем их величина резко падает ($|\Delta\rho| \approx 12''$

при $z=85^\circ$), после чего снова начинает возрастать. У нас нет оснований отнести это нарушение к погрешностям измерений. Значения аномалий на каждом исследуемом зенитном расстоянии определялись из 7—8 наблюдений, а, кроме того, возрастание абсолютной величины аномалии до $z=84,5^\circ$ с последующим резким ее уменьшением обнаружено по независимым между собой сериям наблюдений (как к востоку, так и к западу от меридиана) в точках сферы, удаленных друг от друга по азимуту примерно на 50° . Поэтому разумно объяснить обнаруженный факт некоторыми особенностями прохождения светового луча через слои атмосферы, соответствующие этому зенитному расстоянию в данном секторе в период наблюдений.

Таблица 3

Аномалии рефракции в секторе $325^\circ < a < 0^\circ$
Начало: $22^{\text{h}}10^{\text{m}}$ ($n=76$). Конец: $0^{\text{h}}20^{\text{m}}$

z	$\Delta\rho$	$t, {}^\circ\text{C}$	$B, \text{мм рт.ст.}$	$\frac{dT}{dh}$, град/м	a	Сила и направление ветра
81,5°	+ 1,2"	6,4	745,3	+0,126	359,5°	2,5 NW
82,0	- 5,1	6,4	745,2	+0,126	352,0	2,1
82,5	- 5,4	6,8	745,0	+0,126	347,0	2,3
83,0	- 6,4	6,9	744,8	+0,157	340,0	1,9
83,5	- 8,4	7,0	744,6	0,157	338,0	2,5
84,0	-15,7	7,0	744,3	0,157	335,0	2,7
84,5	-19,8	7,0	744,2	0,157	333,0	2,2
85,0	-11,6	7,1	744,1	0,141	330,0	1,5
85,5	-16,1	7,2	744,0	0,123	328,0	2,8 W
86,0	-20,0	7,4	744,0	0,110	325,0	3,0 NW

Таблица 4

Аномалии рефракции в секторе $0^\circ < a < 40^\circ$
Начало: $0^{\text{h}}30^{\text{m}}$ ($n=92$). Конец: $3^{\text{h}}50^{\text{m}}$

z	$\Delta\rho$	$t, {}^\circ\text{C}$	$B, \text{мм рт.ст.}$	$\frac{dT}{dh}$, град/м	a	Сила и направление ветра
81,5	- 3,1"	6,3	745,3	+0,118	0,5°	2,6 NW
82,0	- 4,1	6,3	745,6	0,118	8,0	2,0
82,5	- 6,4	6,4	745,6	0,126	13,0	2,3
83,0	- 8,5	6,3	745,8	0,157	20,0	3,0
83,5	-11,0	5,9	745,8	0,189	22,0	2,2
84,0	-15,3	5,9	745,8	0,189	25,0	2,1 WNW
85,0	-12,0	5,5	745,5	0,127	30,0	1,9 SW
85,5	-10,2	5,3	745,8	0,094	32,0	2,0 W
86,0	-19,0	5,2	746,0	0,090	35,0	1,8 SW
86,5	-19,2	5,2	746,0	0,081	40,0	2,1 W

Как известно, подобное поведение аномалий рефракции, вычисленных относительно таблиц рефракции ПАО [6], в литературе ранее не отмечалось. Но в работе [9] описывается похожее

явление, наблюдавшееся при исследованиях аномалий рефракции относительно таблиц рефракции Гарфинкеля [8] в северных широтах ($\phi \approx 71^\circ N$), в том же диапазоне зенитных расстояний. Приведем для сравнения аномалии рефракции, полученные в работе [9]:

z	81°	82°	83°	84°	85°	86°
$\Delta\rho$	+29"	+38"	+33"	+19"	+11"	+16"

Перейдем теперь к детальному изучению аномалий рефракции на одних и тех же зенитных расстояниях, но определенных в различных по азимуту секторах небесной сферы. Для этого образуем разности значений аномалий рефракции по разным секторам, комбинируя наблюдения в различных секторах по возможности симметрично относительно основных линий и точек небесной сферы. Получим:

I. По наблюдениям по разные стороны от меридиана.

A. В южной части сферы:

z	$81,5^\circ$	82°	$82,5^\circ$	83°	$83,5^\circ$	84°	$84,5^\circ$	85°	$85,5^\circ$	86°
$\rho_E - \rho_W$	+4,3"	-1,0"	+1,0"	+2,1"	+2,6"	-0,4"	+2,4"	+0,4"	-5,9"	-1,0"

B. В северной части сферы:

z	$84,5^\circ$	85°	$85,5^\circ$	86°	$86,5^\circ$
$\rho_E - \rho_W$	+29,9"	+26,3"	+24,1"	+23,7"	+27,0"

II. По наблюдениям по разные стороны от 1-го вертикала.

A. В восточной части сферы:

z	$84,5^\circ$	85°	$85,5^\circ$	86°	$86,5^\circ$
$\rho_N - \rho_S$	+29,6"	+8,9"	+11,8"	+16,4"	+15,6"

B. В западной части сферы:

z	$81,5^\circ$	82°	$82,5^\circ$	83°	$83,5^\circ$	84°
$\rho_N - \rho_S$	-6,7"	-7,6"	-8,1"	-11,3"	12,0"	-9,7"
$\rho_N - \rho_S$	+2,1"	-17,0"	-18,2"	-8,3"	-12,2"	

B. В сфере в целом:

z	$84,5^\circ$	85°	$85,5^\circ$	86°	$86,5^\circ$
$\rho_N - \rho_S$	+15,8"	-4,0"	-3,2"	+4,1"	+2,3"

III. По наблюдениям по разные стороны от зенита.

A. В направлении $NW - SE$:

z	$81,5^\circ$	82°	$82,5^\circ$	83°	$83,5^\circ$	84°	$84,5^\circ$	85°	$85,5^\circ$	86°
$\rho_{NW} - \rho_{SE}$	-11,0"	-6,3"	-9,1"	-13,4"	-14,6"	-9,3"	-0,3"	-17,4"	-12,3"	-7,3"

B. В направлении $NE - SW$:

z	$84,5^\circ$	85°	$85,5^\circ$	86°	$86,6^\circ$
$\rho_{NE} - \rho_{SW}$	+32,0"	9,3"	+5,9"	+15,4"	+14,8"

Приведем для сравнения значения среднеквадратических ошибок определения рефракции по измеренным зенитным расстояниям Солнца [4] и Луны *:

Солнце			Луна		
z	80°	85°	z	80°	85°
m_p	$\pm 2,0''$	$\pm 2,5''$	m_p	$\pm 2,0''$	$\pm 2,1''$

Сопоставление полученных разностей астрономической рефракции со значениями погрешностей ее определения позволяет сделать следующие выводы:

1. В южной части сферы асимметрия рефракции относительно меридиана места наблюдения не обнаружена (разности рефракции по величине лежат в пределах ошибок ее определения). Аналогичный вывод следует и для асимметрии рефракции относительно 1-го вертикала по усредненным значениям разностей рефракции для северной и южной частей сферы. Исключением является зенитное расстояние $84,5^\circ$, где асимметрия достигает $16''$.

2. В северной части сферы асимметрия рефракции относительно меридиана надежно установлена для $84,5^\circ \leq z \leq 86,5^\circ$. Ее средняя величина в этом диапазоне равна примерно $25''$, причем рефракция к востоку от меридиана оказывается больше, чем к западу.

3. Асимметрия рефракции относительно 1-го вертикала в восточной части сферы достигает в среднем $16''$, а в западном — $10''$, причем в восточной части сферы рефракция к северу от 1-го вертикала больше, а в западном — меньше, чем соответствующие значения рефракции к югу от 1-го вертикала.

4. Асимметрия рефракции относительно зенита места наблюдения в направлениях $NW—SE$ и $NE—SW$ также достигает значимых, в сравнении с погрешностями определения рефракции, величин; в среднем $10''$ и $15''$ соответственно. Знаки разностей рефракции по указанным направлениям свидетельствуют о том, что рефракция NE больше, а на NW меньше, чем рефракция на SW и SE соответственно.

5. По всем рядам разностей рефракции прослеживается общая тенденция возрастания величины асимметрии рефракции в данном секторе при увеличении зенитного расстояния.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в реальной атмосфере величина астрономической рефракции зависит не только от зенитного расстояния наблюдавшего объекта, но и от азимута направления, в котором он наблюдается. Зависимость величины рефракции от азимута для места, где проводился эксперимент, мы представили графически (рис. 2) по данным для диапазона зенитных расстояний $84^\circ < z < 87^\circ$, как наиболее представительного по числу наблюдений.

* Оценка точности определения рефракции по наблюдениям Луны выполнена по формулам, выведенным по аналогии с формулами в работе [4].

Как известно [7], основными методами определения координат пунктов и азимутов направлений, применяемыми в геодезической астрономии, являются парные, то есть методы, основанные на наблюдениях пар звезд на соответственных высотах или азимутах, расположенных симметрично относительно меридиана или 1-го вертикала. При этом в основе теории этих методов лежит классическое положение о симметрии рефракции относительно зенита по любым направлениям небесной сферы.

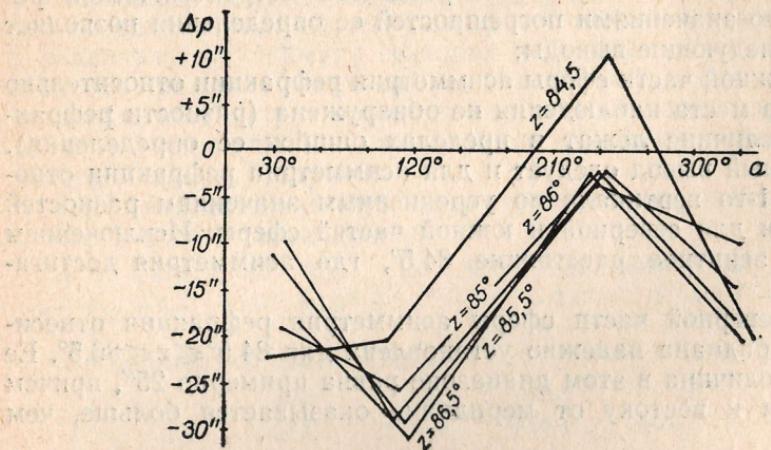


Рис. 2. Измерение аномалий рефракции в зависимости от азимута наблюдения.

Нарушение симметрии рефракции обусловит появление погрешностей в определяемых координатах и азимутах, которые, в зависимости от длительности этого явления, могут носить как случайный, так и, что более опасно, систематический характер.

В наших исследованиях для надежного установления наличия зависимости астрономической рефракции от азимута направления с помощью классического метода определения рефракции по измеренным зенитным расстояниям светил мы ограничились близгоризонтной зоной $-81^\circ < z < 87^\circ$. В то же время известно, что в геодезической астрономии допускается наблюдение звезд на зенитных расстояниях, не превышающих $60-70^\circ$. Очевидно, в зоне $z < 60-70^\circ$ следует ожидать более сложенный характер асимметрии рефракции. Асимметрия рефракции здесь будет малой по величине (порядка ошибок определения рефракции классическим методом), и зависимость ее от азимута будет менее выраженной. Для исследования асимметрии рефракции в зоне $z < 60-70^\circ$ классический метод определения рефракции станет непригодным. Поэтому следует в этой зоне применять сами парные методы геодезической астрономии, которые, по словам А. В. Мазаева [5], «...представляют полную возможность для изучения тонких астрономических вопросов, связанных с астрономической рефракцией».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Н. А. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года. — «Астрономия и Астрофизика», 1972, № 17.
2. Заблоцкий Ф. Д., Киричук В. В. Экспериментальные исследования астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в Заполярье. В кн.: Современные методы учета и исключения влияния рефракций световых волн при геодезических и астрономических измерениях. (Тезисы Всесоюзного совещания), Львов, 1974.
3. Киричук В. В. Об аномалиях астрономической рефракции вблизи горизонта. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1971, вып. 3.
4. Киричук В. В. Исследование астрономической рефракции вблизи горизонта. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Львов, 1972.
5. Мазаев А. В. Исследование астрономической рефракции по материалам наблюдений. — «Вестник ВИКА им. В. В. Куйбышева», 1955, № 88.
6. Таблицы рефракции Пулковской АО АН СССР, М.—Л., 1956.
7. Труды ЦНИИГАиК. Геодезиздат., 1962, вып. 148.
8. Garfinkel B. On investigation in the theory of astronomical refraction. — «Astronomical Journal», 1944, 4, 1148.
9. Wallerstein G. Refraction observations on the Greenland icecap. — «Navigation», 1956, 5, 3.

Работа поступила в редколлегию 10 марта 1976 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института