

Ф. Д. ЗАБЛОЦКИЙ, В. В. КИРИЧУК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ НА БОЛЬШИХ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЯХ В ЗАПОЛЯРЬЕ

Вопрос о надежности учета астрономической рефракции в астрометрии, в морской и воздушной астронавигации — это, по сути дела, вопрос о надежности существующих таблиц рефракции и корректности применения их в различных физико-географических условиях.

Достаточно полный ответ на этот вопрос дает сравнение действительной рефракции, получаемой из астрономических

определений, с соответствующей по метеоусловиям и зенитным расстояниям табличной рефракцией. Подобные экспериментальные исследования, проведенные в широком диапазоне физико-географических условий, позволяют сделать обоснованное заключение о качестве тех или иных таблиц рефракции и наметить пути их улучшения.

На геодезическом факультете Львовского политехнического института, начиная с 1967 г., изучаются различные аспекты проблемы учета астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях применительно к потребности полевой (геодезической) астрономии [2, 3].

Существенным недостатком экспериментальных исследований являлась до сих пор их узкая локализация. Как правило, все полевые наблюдения выполнены в окрестностях г. Львова, ландшафт и физико-географические условия которых типичны для юго-запада СССР, а значит и выводы, полученные на основе этих наблюдений, имели ограниченный характер.

Представляемая на обсуждение работа является итогом первого опыта организации систематических многодневных исследований астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в высоких широтах, в условиях Заполярья.

Интерес к высоким широтам объясняется тем, что в настоящее время быстрыми темпами идет всестороннее изучение и освоение обширных пространств Арктики и Антарктики. Необходимым же условием решения возникающих при этом задач как производственного, так и научно-исследовательского характера, является топографо-геодезическая изученность осваиваемых территорий, которая, в свою очередь, базируется прежде всего на сети астрономических пунктов различной точности.

Основной особенностью астрономических определений в высоких широтах является то, что единственно благоприятный период полевых работ — лето, совпадает с полярным днем. Это обстоятельство резко ограничивает число доступных небесных объектов наблюдения (например, выбор звезд ограничивается видимой величиной $m \leq 3,0-3,5$).

Поскольку одним из основных факторов, лимитирующих точность астрономических определений, являются ошибки учета рефракции, характер и величина которых детально исследованы лишь в средних и низких широтах, как правило, в ночной период, то возникает вопрос о точности учета рефракции в астроопределениях, выполняемых в условиях незаходящего Солнца.

С физической точки зрения ночной период характеризуется наличием в пограничном слое воздуха ($H \simeq 2$ км) устойчивой температурой инверсии. Возникновение инверсионных явлений в атмосфере тесно связано с радиационным балансом подстилающей поверхности, измерение которого (прохождение через 0) меняет знак вертикального градиента температуры.

Переход радиационного баланса через 0 в низких и средних широтах происходит при высотах Солнца над горизонтом

порядка 10—15° [4]. В высоких широтах вопрос о времени возникновения инверсионных явлений в атмосфере изучен пока недостаточно. Но можно предполагать, что большинство астроопределений в высоких широтах выполняются либо при нормальных значениях градиента температуры (то есть при отсутствии инверсии), либо в периоды, соответствующие переходу от нормального распределения температуры воздуха к инверсионному. Последний период является наиболее опасным из-за возникновения в условиях перехода неустойчивых, быстро изменяющихся по величине и знаку, аномалий астрономической рефракции.

Таблица 1

Точность определения величин ρ и $\Delta\rho$

Ошибки	z					
	75°	80°	85°	88°	89°	90°
$m\rho$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 2,7$	$\pm 4,3$	$\pm 8,3$
$m\Delta\rho$	$\pm 2,2$	$\pm 2,2$	$\pm 2,7$	$\pm 2,9$	$\pm 5,0$	$\pm 9,1$

Исходя из указанного, очевидна актуальность и необходимость исследований астрономической рефракции в высоких широтах.

Задачей астрономической экспедиции Львовского политехнического института было получение эмпирических данных о величине, характере изменения во времени и соответствии с «Пулковскими таблицами рефракции» действительной астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях ($75^\circ \leq z \leq 90^\circ$) с одновременными наблюдениями некоторых параметров приземного слоя воздуха в физико-географических условиях северных районов СССР.

Программой полевых работ экспедиции предусматривалось определение действительной астрономической рефракции по наблюдениям зенитных расстояний Солнца и метеорологических факторов: а) температуры, давления воздуха, скорости и направления ветра на высоте инструмента; б) градиентов температуры воздуха в приземном слое ($H \approx 7$ м).

Полевые работы проводились в августе 1973 г. (световой день протяженностью 19—22^ч) с помощью оптического теодолита ОТ-02, с фиксацией моментов измерения зенитных расстояний Солнца способом «глаз—клавиша» на маркопечатающий хронограф. Параллельно с наблюдениями Солнца выполнялись измерения соответствующих метеорологических параметров.

Описанная методика полевых наблюдений апробирована при исследованиях астрономической рефракции в средних широтах [3] и обеспечивает получение значений действительной астрономической рефракции и ее аномалий с точностью достаточной для последующего анализа (см. табл. 1).

Обработка наблюдений Солнца и вычисление табличной рефракции выполнены на ЭВМ «М-222». Для этой цели авторами была составлена программа на языке АЛГОЛ-60 применительно к транслятору ТА-1М. Эта программа позволяет по измеренным зенитным расстояниям и моментам наблюдений Солнца получать действительные и соответствующие табличные значения рефракции и их аномалии.

Таблица 2
Средние значения $\Delta\rho$, T , B и dT/dh

h	z	$\Delta\rho$	$T^{\circ}\text{C}$	$B, \text{ мм}$	$\frac{dT}{dh} \left(\frac{\text{град}}{\text{м}} \right)$
13	76,5	+0,5	12,6	743,6	0,238
15	77,5	+7,2	11,6	743,6	0,231
20	78,5	-1,0	11,2	743,1	0,118
25	79,5	-1,8	11,4	742,1	0,113
23	80,5	-2,9	12,9	741,8	0,058
33	81,5	-7,0	12,9	742,7	0,045
33	82,5	-5,2	12,7	742,2	0,010
43	83,5	-5,6	11,7	735,2	0,038
50	84,5	-6,8	12,0	735,4	0,031
51	85,5	-11,5	9,7	736,2	0,018
44	86,5	-16,2	9,5	736,2	0,100
52	87,5	-25,4	9,0	736,3	0,120
79	88,5	-31,4	7,8	736,9	0,141
54	89,5	-47,3	7,6	737,0	0,152

Результаты обработки экспериментальных наблюдений представляют 530 рядов синхронных значений действительной и табличной рефракции температуры и давления воздуха на высоте инструмента, скорости и направления ветра на высоте инструмента и вертикального градиента температуры в приземном слое воздуха ($H \approx 7 \text{ м}$), охватывающих в общем диапазон зенитных расстояний от 76° до 90° .

В табл. 2—6 приведены осредненные характеристики экспериментальных данных:

Анализ средних значений аномалий астрономической рефракции, приведенных в табл. 2, 3 и 4 позволяет сделать следующие выводы:

1. В зоне $76^{\circ} \leq z \leq 80^{\circ}$ аномалии астрономической рефракции в пределах точности измерений не обнаружены.

2. В зоне $80^{\circ} \leq z \leq 89,5$ установлено наличие, как правило, отрицательных аномалий рефракции, возрастающих по абсолютной величине с увеличением зенитного расстояния и достигающих при $z = 89,5$ в среднем 0,8. Это значит, что вблизи горизонта действительная астрономическая рефракция меньше табличной в среднем на 2,5%.

3. Изменения аномалий астрономической рефракции во времени за период наблюдений на всех зенитных расстояниях от

$z=80^\circ$ до $z=89,5$ значительно превосходят по величине ошибки их определений и достигают соответственно $0,2-0,6$.

4. Аномалии рефракции, определяемые по наблюдениям восходящего Солнца (среднее направление «северо-восток»), как правило, меньше по абсолютной величине аномалий рефракции, определенных по наблюдениям заходящего Солнца (среднее направление «северо-запад»). Этот факт указывает на возможность существования в районе наблюдений асимметрии рефракции относительно меридиана.

Таблица 3
Колебания величин Δp , T , B и dT/dh за период наблюдений

z	Δp		$T^\circ\text{C}$		B , мм		dT/dh (град/м)	
	min	max	min	max	min	max	min	max
76,5	-3"	+4"	+8°	+17°	743	744	+0,17	+0,30
77,5	-1	+8	8	15	743	744	+0,17	+0,30
78,5	+4	+6	8	14	742	744	-0,01	+0,35
79,5	-5	+1	8	14	739	744	-0,09	+0,31
80,5	-5	-2	7	18	739	744	-0,14	+0,28
81,5	-16	+4	9	17	741	744	-0,03	+0,17
82,5	-15	+9	9	16	739	744	-0,08	+0,11
83,5	-2,3	+12	8	14	728	744	-0,06	+0,17
84,5	-20	+14	8	15	728	746	-0,06	+0,27
85,5	-29	-4	8	15	728	746	-0,05	+0,18
86,5	-19	+1	6	14	728	746	-0,01	+0,49
87,5	-36	-10	5	14	728	746	0,0	+0,48
88,5	-52	-24	5	10	729	747	+0,03	+0,47
89,5	-61	-33	5	10	729	747	+0,03	+0,47

Анализ средних характеристик метеорологических параметров приземного слоя воздуха на высоте инструмента и вертикального градиента температуры воздуха в слое высотой 7 м над поверхностью Земли и сопоставление их с соответствующими по времени аномалиями астрономической рефракции (табл. 3, 5 и 6) приводят к следующим выводам.

1) Переход от нормального распределения температуры воздуха в приземном слое к инверсионному происходит в среднем при высоте Солнца над горизонтом 5° .

2) В вечернее время переходной период наступает в разные дни практически при одной и той же высоте Солнца ($h_\odot \approx 3-4^\circ$), несмотря на значительные различия метеоусловий в приземном слое воздуха и происходит с большей скоростью, чем в утреннее время, когда момент наступления переходного периода соответствует более широкому диапазону высот Солнца ($h_\odot \approx 2-10^\circ$) и сопровождается в отдельных случаях аномально большими по величине градиентами инверсии.

3) При относительно постоянной скорости ветра направление его в утреннее и вечернее время противоположно (соответ-

ственно юго-восток и северо-запад), что, с учетом близости пункта наблюдений к морю, указывает на бризовый характер ветра в период наблюдений.

4) В свою очередь, преобладание бризовых ветров указывает на то, что атмосферная обстановка в пункте наблюдений, а, следовательно, и условия лучепреломления формируются под непосредственным влиянием обширных водных поверхностей, что, в частности, согласно исследованиям Н. А. Василенко [1], означает ослабление влияния инверсии температуры на рефракцию при наблюдениях вблизи горизонта. Таким образом, в прибрежной полосе Кольского полуострова, шириной не менее 50 км, следует ожидать существования асимметрии астрономической рефракции в меридиональном направлении.

5) Обнаруженная асимметрия рефракции в направлении первого вертикала объясняется влиянием более близких водных поверхностей, а именно — к востоку и северо-востоку на расстоянии 2—4 км от пункта наблюдений расположен Кольский залив. Поэтому при утренних наблюдениях Солнца на всем диапазоне исследуемых зенитных расстояний визирный луч всегда проходил над заливом. Это обстоятельство, по-видимому, и вызвало уменьшение утренних аномалий рефракции в сравнении с вечерними.

6) Связь между изменениями метеопараметров приземного слоя воздуха у инструмента и изменениями аномалий рефракции практически не обнаружена. По результатам данного эксперимента можно лишь, как на общую тенденцию этой связи, указать на некоторое соответствие меньших по абсолютной величине отрицательных аномалий рефракции совокупности более высоких значений температуры и давления воздуха на высоте инструмента с малыми градиентами инверсии. Подобное отсутствие связи между метеопараметрами воздуха на высоте инструмента и аномалиями рефракции на больших зенитных расстояниях отмечалась и ранее [2] при изучении рефракции в средних широтах.

Тогда же указывалось, что основная причина невозможности установить надежную зависимость между этими величинами связана с тем, что метеопараметры приземного слоя воздуха, измеренные у инструмента, не являются достаточно представительными данными о преломляющих свойствах атмосферы при учете рефракции на больших зенитных расстояниях, когда ви-

Таблица 4
Средние утренние и вечерние аномалии рефракции

z	аномалий рефракции	
	утренние	вечерние
84,5	+ 8,2	—17,7
85,5	+ 6,0	—23,0
86,5	— 6,8	—29,0
87,5	—17,7	—31,3
88,5	—30,2	—34,2
89,5	—44,0	—47,1

Таблица 5
Сопоставление аномалий рефракции с метеофакторами в период утренних наблюдений

z	10. VIII				12. VIII				14. VIII			
	Δp	$T^{\circ}C$	$B, мм$	$dT/dh, (град/м)$	Δp	$T^{\circ}C$	$B, мм$	$dT/dh, (град/м)$	Δp	$T^{\circ}C$	$B, мм$	$dT/dh, (град/м)$
80,5	-2,9	7,8	743,6	+0,283	-1,0	11,4	741,6	-0,047	+2,0	7,9	745,4	-0,047
86,5	+0,7	5,8	743,2	+0,488	-19,1	10,3	741,8	+0,010	-4,4	6,5	746,1	-0,013
87,5	-12,5	5,6	743,1	+0,479	-35,6	10,0	742,1	+0,079	-11,4	6,3	746,2	+0,011
88,5	-23,5	5,2	742,6	+0,470	-41,7	9,7	742,2	+0,116	-27,6	6,0	746,2	+0,031
89,5	-39,9	5,2	742,6	+0,463	-54,3	10,0	741,9	+0,165	-41,0	5,4	746,0	+0,063
Средняя скорость и направление ветра	1,5 м/сек; ЮВ				0,6 м/сек; ЮВ				2,4 м/сек; ЮЗ			
Средний азимут Солнца	236°				240°				244°			

Таблица 6
Сопоставление аномалий рефракции с метеофакторами в период вечерних наблюдений

z	13. VIII				16. VIII				19. VIII			
	Δp	$T^{\circ}C$	$B, мм$	$dT/dh, (град/м)$	Δp	$T^{\circ}C$	$B, мм$	$dT/dh, (град/м)$	Δp	$T^{\circ}C$	$B, мм$	$dT/dh, (град/м)$
80,5	-3,4	11,5	741,8	-0,051	-3,0	9,0	744,1	-0,002	+1,0	13,1	727,8	-0,024
86,5	-29,4	8,1	742,8	0,000	-22,5	7,7	744,9	+0,079	-13,2	11,0	738,4	+0,017
87,5	-31,4	7,8	743,2	+0,107	-39,0	7,6	745,0	+0,111	-9,7	10,7	738,6	+0,047
88,5	-38,3	7,8	743,4	+0,069	-51,4	7,5	745,1	+0,130	-23,6	10,3	728,9	+0,028
89,5	-54,7	7,7	743,5	+0,029	-60,7	7,6	745,2	+0,126	-33,0	9,8	729,1	+0,063
Средняя скорость и направление ветра	2,2 м/сек; З; СЗ				0,0 м/сек				4,0 м/сек; З			
Средний азимут Солнца	122°				117°				114°			

зирный луч на большом протяжении проходит в непосредственной близости к земной поверхности.

В заключение приводим некоторые общие выводы, подводящие итог выполненным исследованиям.

1. Пулковские таблицы рефракции обеспечивают учет рефракции при дневных астрономических наблюдениях в физико-географических условиях Заполярья ($\varphi \approx 69^\circ$) с точностью соответствующей требованиям, предъявляемым к астроопределениям первого класса, для зенитных расстояний $0^\circ \leq z \leq 80^\circ$.

2. Применение Пулковских таблиц для учета рефракции при наблюдениях светил в зоне $80^\circ < z < 90^\circ$ влечет появление недопустимых погрешностей в измеренных зенитных расстояниях, обусловленных аномалиями рефракции и их изменениями во времени.

3. Обнаруженная экспериментально асимметрия астрономической рефракции в направлении первого вертикала и объективные предпосылки для существования меридиональной асимметрии рефракции в Заполярье требуют известной осторожности при применении точных астрономических методов, основанных на наблюдении звезд на равных высотах. Однако вопрос о величине влияния асимметрии рефракции на точность астрономических определений по методу равных высот требует специальных исследований.

4. При выполнении дневных астрономических определений в Заполярье зенитальными методами следует избегать периода перехода от нормального распределения температуры воздуха к инверсионному, который соответствует высотам Солнца над горизонтом порядка $2-10^\circ$, и является особенно опасным в смысле погрешностей учета рефракции в утреннее время.

Данная статья представляет собой расширенный вариант доклада, прочитанного на Всесоюзном совещании по современным методам учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях (г. Львов, 16—19 апреля 1974 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Н. А. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года. — «Астрометрия и астрофизика», 1972, вып. 17.

2. Киричук В. В. Об аномалиях астрономической рефракции вблизи горизонта. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1971, вып. 3.

3. Киричук В. В. Геодезическая рефракция и аномалии астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях ($z=88-90^\circ$). — «Геодезия, картография, и аэрофотосъемка», 1971, вып. 13.

4. Киричук В. В. Радиационный баланс земной поверхности и наклоны изодиоптрических поверхностей. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1972, вып. 16.

Работа поступила в редколлегию 26 апреля 1974 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.