

Ф. Д. ЗАБЛОЦКИЙ, Л. А. КУЛИШ

## К ВОПРОСУ УЧЕТА АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ В АНТАРКТИДЕ

Результаты астрономических наблюдений по измерениям зенитных расстояний небесных светил на малых высотах ( $z > 70^\circ$ ) значительно искажаются влиянием астрономической рефракции. Существующие таблицы рефракции не всегда однозначно способствуют разрешению этой проблемы. Поэтому инструкции ограничивают по высоте выбор небесных светил, что существенно уменьшает количество пригодных для наблюдений звезд в том или ином методе. Это создает значительные трудности при выполнении программ наблюдений, особенно в полярных районах, где зачастую астроопределения приходится выполнять в период полярного лета по наблюдениям очень малого количества ярких звезд. Так, даже при ясной погоде на станции Восток в январе—феврале 1972 г. потребовалось больше месяца для определения широты и долготы зенитальными методами по программе I класса.

Помимо высокоточных астроопределений в полярных районах, в частности в Антарктиде, проводимых пока лишь эпизодически, в большом объеме выполняют наблюдения по программе III и IV классов, согласно Инструкции [2] преимущественно способом Сомнера. Из опыта астрономов, работавших на шестом континенте, вытекает, что основной проблемой чаще всего является точный учет астрономической рефракции. Кроме указанных астроопределений, в Антарктиде возникает необходимость почти повседневно выполнять приближенные астроопределения по наблюдениям Солнца, при этом его фиксацию приходится вести на больших зенитных расстояниях, а в переходные периоды от полярного дня к полярной ночи и наоборот — лишь в близгоризонтной зоне.

Учитывая это, нами сделана попытка выполнить применительно к условиям Антарктиды теоретическое исследование астрономической рефракции при  $z > 70^\circ$ , оценить ее величину в зависимости от времени года и положения точки определения и проанализировать существующие способы учета рефракции.

Материалом для исследований послужили осредненные примерно за 10 лет среднемесячные данные температуры и влажности воздуха на стандартных изобарических поверхностях десяти антарктических станций. Метеопараметры верхних слоев атмосферы (выше 10-й изобары) до 80 км определены по графикам, характеризующим строение стратосферы и мезосферы над Центральной Антарктидой [1].

В табл. 1 первые три станции представляют внутриконтинентальную Антарктиду, остальные расположены вдоль ее береговой зоны.

Указанные материалы мы получили от метеорологического отдела Научно-исследовательского института Арктики и Антарктики. По ним была вычислена астрономическая рефракция на каж-

дой станции для двух месяцев — летнего (января) и зимнего (августа), соответствующих экстремальным значениям метеопараметров. Вычисление производилось по методу Mikkola [7] для длины волны светового луча 550 нм, для зенитных расстояний от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом через  $5^\circ$ , от  $45^\circ$  до  $71^\circ$  — через  $2^\circ$  и от  $71^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $1^\circ$ . Для этого нами составлена программа на языке Фортран-4. Для оценки точности используемого метода согласно программе были вычислены по данным стандартной атмосферы

Таблица 1  
Географическое положение антарктических станций

Название станции	Высота над уровнем моря (м)	Географические координаты		Период наблюдений в годах
		$\varphi$	$\lambda$	
Восток	3420*	$-78^\circ 28'$	$106^\circ 48'$ в. д.	11
Амундсен—Скотт	2800	$-90^\circ 00'$	—	9
Бэрд	1515	$-80^\circ 01'$	$119^\circ 32'$ з. д.	9
Мирный	42	$-66^\circ 33'$	$93^\circ 01'$ в. д.	12
Молодежная	39	$-67^\circ 40'$	$45^\circ 51'$ в. д.	5
Новолазаревская	99	$-70^\circ 46'$	$11^\circ 50'$ в. д.	11
Дюмон-д Юрвиль	40	$-66^\circ 40'$	$140^\circ 01'$ в. д.	6
Халли-Бей	28	$-75^\circ 30'$	$26^\circ 39'$ з. д.	9
Арджентайн-Айлендс	11	$-65^\circ 15'$	$64^\circ 16'$ з. д.	9
Мак-Мердо	24	$-77^\circ 51'$	$166^\circ 37'$ в. д.	9

\* В настоящее время высота станции Восток над уровнем моря принята 3466 м.

ГОСТ—73 значения астрономической рефракции, которые сравнивались с соответствующими значениями, полученными А. И. Нефедьевой, интегрированием по методу Симпсона [4]. Расхождение на всем диапазоне зенитных расстояний вплоть до  $89^\circ$  не превышало  $0,1''$ .

При вычислении рефракции на данном этапе влажность воздуха из-за ее малости не учитывалась. Так, из указанных в табл. 1 станций наибольшая среднемесячная влажность установлена для станции Арджентайн-Айлендс. Она была равна у поверхности для самого теплого месяца (января)  $e = 5,4$  мб. Неучет этой величины вызывает следующие погрешности рефракции:

$z$	$71^\circ$	$75^\circ$	$80^\circ$	$85^\circ$	$87^\circ$	$89^\circ$
$\rho_c - \rho_{вл}$	$+0,14''$	$+0,18''$	$+0,27''$	$+0,52''$	$+0,74''$	$+1,27''$

Вычисленная рефракция сравнивалась с табличной, полученной по аргументам  $t$  и  $B$  у поверхности станции. Для этого применялись новые таблицы рефракции, составленные А. И. Нефедьевой в астрономической обсерватории им. Энгельгардта [4], Пулковские таблицы рефракции [5], таблицы учета астрономической рефракции в Арктике и Антарктике, составленные в Институте теоретической астрономии И. П. Шницбергом [6]. По этим таблицам были вычислены для указанных выше станций



значения рефракции лишь для зенитных расстояний 71°, 75°, 80°, 85°, 87°, 89°. Причем значения рефракции, вычисленные по Пулковским таблицам и таблицам И. П. Шпицберга, были приведены к длине волны 550 нм, положенной в основу таблиц рефракции А. И. Нефедьевой.

В табл. 2 (колонки 3—8) приведены разности  $\Delta r_n$  и  $\Delta r_p$  между вычисленной рефракцией и полученной по таблицам А. И. Нефедьевой и Пулковским таблицам соответственно. Разности  $\Delta r_{ш}$  между вычисленной рефракцией и полученной с помощью таблиц

Таблица 2

Значения  $\Delta r_n$ ,  $\Delta r_p$  на антарктических станциях

Станция, месяц	Индекс	Зенитные расстояния						$\gamma_p^\circ/\text{км}$ (/h км)	В мб t °C у поверхн.
		71°	75°	80°	85°	87°	89°		
Восток	Н	-0,20	-0,26	-0,33	-0,39	-1,11	-22,77	-0,9	634
(январь)	П	-0,24	-0,37	-0,33	-0,27	+1,12	+15,29	(1,70)	-34,9
Амундсен—Скотт	Н	-0,27	-0,33	-0,46	-0,74	-1,87	-27,03	-3,1	687
(январь)	П	-0,27	-0,39	-0,37	-0,23	+1,17	+11,74	(2,26)	-28,6
Бэрд	Н	-0,34	-0,43	-0,65	-1,32	-3,22	-28,44	-5,0	814
(январь)	П	-0,26	-0,36	-0,37	-0,28	+0,22	+1,63	(1,14)	-13,0
Восток	Н	-0,27	-0,34	-0,50	-0,73	-0,32	+15,13	+15,5	620
(август)	П	-0,47	-0,73	-1,08	-2,74	-1,43	+1'07,61	(1,46)	-68,7
Амундсен—Скотт	Н	-0,31	-0,37	-0,44	-0,04	-0,81	-5,90	+7,1	677
(август)	П	-0,38	-0,57	-0,68	-0,84	+2,34	+55,93	(2,05)	-59,5
Бэрд	Н	-0,42	-0,54	-0,84	-2,05	-4,59	-18,31	+9,6	803
(август)	П	-0,37	-0,52	-0,72	-1,29	+0,31	+47,6*	(0,98)	-37,8
Восток *	Н	-0,20	-0,26	-0,33	-0,34	-0,90	-18,38	+4,8	634
(январь)	П	-0,24	-0,37	-0,33	-0,22	+1,33	+19,74	(0,58)	-34,9
Восток *	Н	-0,27	-0,33	-0,44	-0,23	+1,88	+52,43	+43,1	620
(август)	П	-0,47	-0,72	-1,02	-2,24	+0,77	+1'44,91	(0,58)	-68,7
Мирный	Н	-0,38	-0,49	-0,75	-1,49	-2,89	-20,45	-4,4	986
(январь)	П	-0,20	-0,25	-0,33	-0,18	+0,58	+5,88	(1,16)	-3,3
Халли—Бей	Н	-0,21	-0,27	-0,40	-0,79	-1,50	-19,24	-4,4	987
(январь)	П	-0,03	-0,03	+0,02	+0,59	+1,78	+9,06	(1,16)	-4,5
Арджентайн—									
Айлендс	Н	-0,37	-0,48	-0,72	-1,41	-2,74	-18,41	-4,9	987
(январь)	П	-0,19	-0,24	-0,30	-0,21	+0,18	+2,12	(1,18)	0,0
Мирный	Н	-0,43	-0,55	-0,89	-2,29	-5,53	-32,29	-2,3	981
(август)	П	-0,24	-0,32	-0,48	-0,62	+0,44	+19,92	(1,06)	-18,0
Халли—Бей	Н	-0,56	-0,74	-1,17	-2,79	-5,47	-16,78	+6,9	986
(август)	П	-0,37	-0,50	-0,79	-1,04	+1,84	+1'01,30	(1,09)	-29,2
Арджентайн—									
Айлендс	Н	-0,42	-0,55	-0,94	-2,58	-5,61	-19,83	+0,8	991
(август)	П	-0,23	-0,32	-0,54	-0,98	-0,28	+4,37	(1,17)	-13,8
Мирный *	Н	-0,38	-0,49	-0,74	-1,47	-2,79	-18,37	-2,8	986
(январь)	П	-0,20	-0,25	-0,32	-0,16	+0,68	+7,96	(0,46)	-3,3
Мирный *	Н	-0,43	-0,55	-0,73	-2,20	-5,18	-27,51	+0,2	981
(август)	П	-0,24	-0,32	-0,31	-0,53	+0,79	+24,70	(0,46)	-18,0

И. П. Шпицберга здесь не приведены, так как практически во всех случаях по абсолютной величине  $\Delta r_{ш} > \Delta r_n$ . Это объясняется тем, что таблицы И. П. Шпицберга составлены не на основании какой-то реальной модели атмосферы, а представляют собой экс-

траполяцию Пулковских таблиц по температуре до  $-50^\circ$  и давлению до 400 мб. Кроме того, в ущерб точности учета рефракции вычисление редуцированных поправок за температуру и давление в этих таблицах упрощено по сравнению с Пулковскими. В колонке 9 даны вертикальные температурные градиенты  $\gamma_i$  и указаны слои воздуха, в которых они получены, причем положительные значения  $\gamma_i$  соответствуют инверсионному распределению температуры. В колонке 10 приведены величины  $B$  и  $t$  на нижней границе слоя (у поверхности станции).

В табл. 2 из семи береговых станций приведены разности  $\Delta r$  лишь для трех наиболее характерных: Мирный, Халли-Бей, Арджентайн—Айлендс. Кроме того, для станций Восток и Мирный, помещенных в табл. 2 звездочками, были составлены модели атмосферы, включающие дополнительно в пограничном слое метеопараметры на стандартных высотах.

Рассмотрим результаты вычислений в табл. 2. Включительно до зенитного расстояния  $z \leq 85^\circ$  вычисленная рефракция меньше табличной. При  $z \geq 87^\circ$  значения  $\Delta r_n$  и  $\Delta r_p$  противоположны по знаку, за исключением двух случаев: Восток—август и Восток\*—август, в которых  $\Delta r_n$  принимает положительное значение, т. е. вычисленная рефракция становится больше табличной. Это объясняется сверхмощной инверсией, характеризующейся в первом случае величиной  $\gamma_i = +15,5^\circ$  в слое между поверхностью станции и нижней изобарической поверхностью 500 мб; во втором —  $\gamma_i = +43,1^\circ$  между поверхностью станции и нижним уровнем стандартных высот, равным 4 км. Следует отметить, что в летних моделях разности рефракции, особенно  $\Delta r_p$ , намного меньше соответствующих разностей в зимних моделях, причем практически во всех случаях в близгоризонтной зоне  $r_{выч.} > r_n$ . Существенное уменьшение разности  $\Delta r_n$  (с учетом знака) при переходе от августа к январю характерно лишь для внутриконтинентальной зоны, где отмечаются большие различия между зимними и летними температурными градиентами в пограничном слое.

Для береговой зоны различия в соответствующих величинах  $\gamma_i$  значительно меньше и здесь явно не выражена зависимость  $\Delta r_n$  от  $\gamma_i$ . Это объясняется тем, что указанные температурные градиенты вычислены в слоях больше 1 км и в зимний период они зачастую не соответствуют реальным градиентам (положительным) в приземном слое. С учетом последних, вычисленная рефракция была бы больше по величине и разности  $\Delta r_n$ , а также и  $\Delta r_p$  увеличивались бы с учетом знака.

На основании изложенного видно, что в условиях Антарктиды существующие таблицы (особенно Пулковские, а тем более таблицы И. П. Шпицберга) не могут обеспечить надежного определения астрономической рефракции при наблюдениях светил на больших зенитных расстояниях. Таким образом, для точного учета астрономической рефракции в Антарктиде необходимо учитывать особое строение пограничного слоя, характеризующееся мощными температурными инверсиями в Центральной Антарктиде и частыми инверсиями в приземном слое вдоль береговой зоны.



Особенности пограничного слоя атмосферы Антарктиды, высокоширотное расположение материка обуславливают строение и верхних слоев атмосферы. В табл. 3 приведены осредненные по моделям атмосферы станций, указанных в табл. 1, температурные градиенты в слоях между стандартными изобарическими поверхностями и геопотенциальные высоты этих поверхностей. Для сравнения распределения среднемесячных значений  $\gamma$  и высот стандартных изобарических поверхностей над антарктическими

Таблиц  
Значения вертикальных температурных градиентов (град/км)  
и высот стандартных изобарических поверхностей (гп км)  
в свободной атмосфере

Зона	Месяц	Градиент, высота	Изобарические поверхности (мб)							
			850	700	500	300	200	100	50	30
Летний период										
СССР	Июль	$\gamma$	-5,16	-5,85	-6,92	-0,56	+0,15	+0,50	+0,22	+1,3
		H	1,38	2,93	5,49	9,10	11,82	16,51	20,60	23,90
Антарктида: береговая	Январь	$\gamma$	-5,44	-5,55	-5,77	+2,17	+0,78	+0,56	+0,59	+1,1
		H	1,20	2,68	5,14	8,61	11,28	15,95	20,6	24,20
центральная	Январь	$\gamma$	-	-4,96	-5,07	+3,16	+0,91	+0,55	+0,33	+1,3
		H	-	2,66	5,09	8,51	11,18	15,89	20,67	24,21
Зимний период										
СССР	Февраль	$\gamma$	-4,22	-5,88	-6,54	-1,20	-0,23	0,00	+0,31	+0,3
		H	1,33	2,75	5,13	8,49	11,04	15,33	20,60	23,90
Антарктида: береговая	Август	$\gamma$	-3,11	-5,79	-6,70	-4,09	-1,28	-0,69	+0,06	+1,1
		H	1,12	2,53	4,92	8,26	10,70	14,74	18,69	21,60
центральная	Август	$\gamma$	-	-2,54	-6,47	-4,26	-1,87	-1,28	-0,33	+1,1
		H	-	2,55	4,86	8,13	10,52	14,47	18,27	21,00

станциями приведены соответствующие характеристики для территории СССР ( $\varphi = 80^\circ - 40^\circ$ ), заимствованные из работы А. И. Нефедьевой [3]. Как видно из табл. 3, сохраняются существенные различия в строении свободной атмосферы высоких широт территории СССР и района Антарктиды. Причем в зимний период, особенно в центральной зоне Антарктиды, отмечается значительное понижение изобарических поверхностей.

В заключение следует отметить следующее. На материке Антарктида площадью более 14 млн. кв. км в течение последних 30 лет проводятся обширные систематические исследования учеными более 10 стран мира, из которых ведущее место занимают работы советских ученых, участников комплексных антарктических экспедиций. В связи с расширением исследований и освоения Антарктиды будут возрастать требования к точности астрономических определений и к единственно возможным вариантам определения абсолютных высокоточных координат в региональных и локальных сетях. Частичному разрешению этого вопроса могут спо-

собствовать таблицы астрономической рефракции, в основу которых должны быть положены оптимальные модели атмосферы южнополярного материка.

Список литературы: 1. Атлас Антарктики. — Л.: Гидрометеоздат, 1969, т. 2. 2. Инструкция по астрономическим определениям пунктов I, II, III, IV классов. — М.: Геодезиздат, 1948. 3. Нефедьева А. И. Астрономическая рефракция. — Известия АОЭ, Ч. II, 1973, № 40. 4. Нефедьева А. И. Таблицы астрономической рефракции. — Известия АОЭ, 1978, № 45. 5. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. 4-е издание. — М.: Л., Изд-во АН СССР. 6. Шницберг И. П. Таблицы астрономической рефракции. — Л.: Аркт. и антаркт. науч. исслед. ин-т. Ротапр., 1961. 7. Mikkola S. Employing aerological measurement data for refraction evaluation. — Suomen geod. laitok tied, 1979, N 3.

Статья поступила в редколлегию 13.04.82

УДК 528:551.524.4

И. Н. КМЕТКО, Н. И. КРАВЦОВ, В. О. ЛИТИНСКИЙ

### СОВМЕСТНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА В ТРЕХМЕТРОВОМ ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

При геодезических измерениях необходимо учитывать влияние внешних условий на их точность. Одним из факторов, отрицательно влияющих на точность измерений, является рефракция. При ее учете, например в процессе геометрического нивелирования, необходимо принимать во внимание значения вертикальных температурных градиентов в приземном слое воздуха в периоды наблюдений. Важным моментом является то, что ночью знак вертикальных разностей температуры  $\Delta t$  положительный (инверсия температуры), а днем — отрицательный (нормальное распределение температуры). Изменение знака происходит в периоды утренней и вечерней видимостей. Для изучения и учета рефракционных погрешностей результатов измерений, которые зависят от  $\Delta t$  и соответствуют им по знаку, необходимо определять температурные разности на всех станциях. Измерение лишь температуры воздуха при нивелировании «... через каждые две станции на высоте инструмента» [1] не дает пользы в смысле повышения точности измерений.

Если мы не собираемся вводить поправки за рефракцию в измеренные превышения, то знание лишь знака  $\Delta t$  весьма полезно, так как в этом случае можно выполнять нивелирование секции по частям при противоположных знаках  $\Delta t$  и тем самым компенсировать в основном рефракционные погрешности [2].

Одновременно контролируется длительность периодов наблюдений, кроме колебаний изображений, абсолютными значениями  $\Delta t$ .