

## О МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ В АНТАРКТИДЕ

Точность астрономических определений координат в значительной степени зависит от учета влияния астрономической рефракции на положение наблюдаемых объектов (звезд, Солнца, планет, ИСЗ и др.). В основе решения проблемы учета астрономической рефракции лежит тот или иной подход к количественной оценке угла преломления светового луча при его прохождении через земную атмосферу. К настоящему времени определились следующие подходы к решению этой проблемы [6, 8, 9]:

1. Модельный — представление атмосферы с помощью модели, основанной на многолетних аэрологических наблюдениях.

2. Аэрологический — учет влияния астрономической рефракции по данным аэрологического зондирования атмосферы в момент астрономических наблюдений.

3. Инструментальный \* — совокупная количественная оценка угла рефракции, основанная на использовании явлений интерференции и дисперсии мультихроматических световых волн, наблюдающихся при прохождении волн через неоднородную среду.

Наибольшее распространение получил модельный подход, в котором в последнее время четко прослеживаются две тенденции. Первая — построение глобальной модели земной атмосферы, и, следовательно, глобальных таблиц астрономической рефракции; вторая — построение региональных моделей атмосферы, и, следовательно, региональных таблиц, соответствующих местоположениям основных астрономических обсерваторий, с дальнейшей детализацией этих таблиц в зависимости от сезонных и месячных вариаций состояния атмосферы над данным регионом.

Долгое время астрономы считали, что глобальные таблицы рефракции и, кроме того, региональные [12] полностью обес-

---

\* Этот подход, несомненно, является наиболее прогрессивным, но он, к сожалению, еще фактически не вышел из стадии макетных разработок.

печивают по точности большинство астрономических определений в самых различных физико-географических условиях. Это привело к необоснованной механической экстраполяции существующих таблиц рефракции [12, 16, 18, 19] на регионы, резко отличающиеся состоянием атмосферы от модели земной атмосферы, положенной в основу этих таблиц.

Экспериментальные исследования астрономической рефракции и ее аномалий, проведенные за последние 15—20 лет, опровергли эту устоявшуюся точку зрения. Особенно показательны в этом смысле результаты сравнения «истинных» (наблюденных) значений рефракции с табличными для больших зенитных расстояний в районе с экстремальными значениями метеопараметров атмосферы и их вариаций [2, 4, 20].

Обширные исследования в Антарктиде (по гляциологии, картографии, изучению фигуры Земли и др.) требуют наличия геодезической основы, которая может быть создана в виде локальных сетей, опирающихся на высокоточные астрономические пункты [3].

Ряд астрономических определений в Антарктиде [1, 5, 7, 17] выявил наличие там аномальных атмосферных эффектов, неучет которых приводит к существенному снижению точности астрономических работ. Если учесть к тому же, что в настоящее время и в будущем, помимо астрономических определений, в Антарктиде развиваются спутниковые наблюдения, то проблема учета рефракции приобретает особо важное значение.

Поскольку для Антарктиды характерны экстремальные значения метеопараметров атмосферы и их вариаций (месячных, сезонных и суточных), то для повышения точности учета астрономической рефракции следует создавать региональные таблицы рефракции, построенные на основании аэрологических зондирований реальной атмосферы над Антарктидой.

На основании материалов аэрологических наблюдений в Антарктиде в 1957—1958 гг. [14, 15] нами построены две модели земной атмосферы до высоты 20 км \*: модель I — для прибрежной и модель II — для внутренеконтинентальной зоны. Модель I основана на материалах четырехразовых ежесуточных аэрологических наблюдений на станции «Мирный» ( $\phi \approx 66^{\circ}5S$ ), а модель II — на материалах аналогичных одноразовых наблюдений на станции «Восток» ( $\phi \approx 78^{\circ}5S$ ). Ниже приводятся основные характеристики моделей, соответствующие среднемесечным и среднегодовым состояниям реальной атмосферы над пунктами «Мирный» и «Восток» \*\*.

Значения плотности воздуха, вертикального градиента температуры и величин  $a$ , характеризующих скорость убывания

\* Эта высота в большинстве случаев соответствует высоте подъема аэрологических зондов.

\*\* Из-за недостатка места приводятся данные только для двух месяцев — января и июля.

Таблица 1

Модель атмосферы I (ст. «Мирный»,  $\varphi \approx 66^\circ, S$ )

H, км	$\rho, \text{г}/\text{м}^3$	Январь, $T_o = 271,1 \text{ К}$ $P_o = 988 \text{ мб}$		Июль, $T_o = 256,3 \text{ К}$ $P_o = 982 \text{ мб}$		Среднегодовая $T_o = 261,1 \text{ К}$ $P_o = 985 \text{ мб}$			
		$dT/dh,$ град/км	$a$	$\rho, \text{г}/\text{м}^3$	$a$	$dT/dh,$ град/км	$\rho, \text{г}/\text{м}^3$		
0,03	1269,8	0,12626	-1,3	1320,9	0,13240	-2,0	1314,5	0,13099	+2,1
0,20	1244,0	0,12647	-2,4	1293,3	0,13242	+0,4	1283,3	0,13101	-1,9
0,50	1201,0	0,12730	-6,1	1241,9	0,13277	-3,3	1236,6	0,13167	-4,4
1,00	1138,7	0,12859	-4,4	1169,6	0,13342	-2,0	1167,7	0,13264	-3,1
1,50	1078,6	0,12966	-4,8	1098,4	0,13423	-4,3	1099,3	0,13346	-3,4
2,00	1020,2	0,13142	-3,9	1035,9	0,13599	-4,5	1035,4	0,13511	-4,5
3,00	908,6	0,13398	-6,0	920,6	0,13887	-6,0	921,1	0,13775	-5,6
4,00	813,8	0,13703	-5,3	820,9	0,14255	-6,8	820,6	0,14102	-5,7
5,00	725,3	0,14026	-6,1	732,5	0,14658	-6,4	729,9	0,14458	-5,8
6,00	646,4	0,14382	-6,5	650,3	0,15062	-6,2	648,3	0,14836	-5,9
7,00	575,1	0,14770	-5,9	574,9	0,15484	-6,3	537,7	0,15210	-5,3
8,00	510,1	0,15083	-3,7	506,7	0,15893	-5,2	505,0	0,15522	-3,7
9,00	445,3	0,15166	+1,2	443,0	0,16194	-2,9	439,7	0,15703	-1,4
10,00	380,8	0,15052	+2,1	382,1	0,16373	-0,7	378,3	0,15732	+0,8
11,00	324,5	0,14929	+1,4	327,3	0,16451	-0,7	322,4	0,15685	+0,6
12,00	277,6	0,14854	+0,7	278,5	0,16507	-0,8	274,6	0,15646	+0,4
13,00	238,6	0,14835	+0,5	237,1	0,16579	-1,0	234,4	0,15619	+0,3
14,00	205,2	0,14770	+0,4	201,9	0,16639	-1,1	200,2	0,15600	+0,2
15,00	176,7	0,14735	+0,4	171,8	0,16747	-1,1	171,2	0,15593	0
16,00	152,1	0,14700	+0,4	145,9	0,16900	-0,9	146,4	0,25572	+0,1
17,00	131,1	0,14668	+0,3	124,3	0,16953	-0,9	125,3	0,15582	0
18,00	112,9	0,14643	+0,2	105,2	0,17014	-0,7	107,2	0,15557	0
19,00	97,5	0,14617	+0,3	89,0	0,17048	-0,2	91,9	0,15546	+0,1
20,00	84,0			75,2			78,6		

Таблица 2

Модель атмосферы II (ст. «Восток», $\varphi = 78^\circ$ , 5 S)						Среднегодовия $T_0 = 216$ , 5K $P_0 = 622$ мб			
Январь, $T_0 = 240$ , 3K $P_0 = 633$ мб			Июль, $T_0 = 205$ , 2K $P_0 = 610$ мб			$dT/dh$ , град/км			
$H$ , км	$\rho$ , $\text{г м}^{-3}$	$a$	$\rho$ , $\text{г м}^{-3}$	$a$	$dT/dh$ , град/км	$\rho$ , $\text{г м}^{-3}$	$a$	$dT/dh$ , град/км	
3,42*	918,0	0,14233	-0,3	1062,9	0,16511	+49,3	1006,9	0,15686	+57,6
3,50	907,9	0,14255	-1,6	1029,2	0,15575	+42,2	972,0	0,15132	+20,8
4,00	848,2	0,14293	-1,2	864,8	0,14880	-1,8	858,6	0,14775	-0,4
4,50	791,6	0,14359	-3,3	806,0	0,14992	-5,0	797,7	0,14840	-3,9
5,00	741,9	0,14587	-5,9	756,2	0,15269	-5,8	747,0	0,15084	-5,5
6,00	657,6	0,14985	-6,6	666,2	0,15686	-6,1	658,6	0,15472	-5,8
7,00	582,8	0,15378	-5,2	585,8	0,16083	-4,7	579,2	0,15851	-4,9
8,00	511,5	0,15512	+1,2	510,0	0,16431	-4,4	505,7	0,16105	-1,9
9,00	435,8	0,15288	+5,1	442,0	0,16652	-3,4	434,6	0,16160	-0,5
10,00	365,4	0,15021	+2,6	380,9	0,16893	-2,6	368,8	0,16134	+0,4
11,00	310,9	0,14892	+1,2	326,0	0,17129	-3,4	313,6	0,16083	+0,2
12,00	266,4	0,14817	+0,9	281,6	0,10321	-1,2	267,1	0,16120	0
13,00	228,8	0,14755	+0,8	238,2			227,9	0,16011	-0,1
14,00	196,7	0,14696	+0,9				193,4	0,16002	+0,1
15,00	169,1	0,14889	+0,8				165,0	0,16017	+0,1
16,00	145,6	0,14584	+0,5				140,7	0,15997	+0,1
17,00	125,4	0,14534	+0,8				119,8	0,15771	+0,2
18,00	108,1	0,14485	+0,6				102,4	0,15745	+0,4
19,00	93,2	0,14428	+0,9				87,4	0,15458	+0,4
20,00	80,4						75,3		

\*  $H=3,42$  км — соответствует высоте станции «Восток» над уровнем моря.

плотности воздуха с высотой, получены по следующим формулам [13, 8]:

$$\rho_i = \frac{P_i}{R \cdot T_i}; \quad (1)$$

$$\left( \frac{dT}{dh} \right)_i = \frac{T_i - T_{0i}}{h_i}; \quad (2)$$

$$a_i = \frac{g_0}{R T_i} \left[ 1 - \frac{b_i h_i}{2 T_i} + \frac{b_i^2 h_i^2}{3 T_i^2} - \dots \right]. \quad (3)$$

Здесь  $R$  — газовая постоянная сухого воздуха \*;  $\rho_i$ ,  $P_i$ ,  $T_i$  — плотность, давление и температура воздуха соответственно на высоте  $H_i$  над уровнем моря;  $T_{0i}$  и  $T_i$  — температура воздуха

Таблица 3  
Стандартная модель атмосферы [11]

$T_0=288,1$ К				$P_0=1013$ мб			
$H$ , км	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$H$ , км	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$H$ , км	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$H$ , км	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>
0	1225	2,00	1007	8,00	526	14,00	228
0,05	1219	3,00	909	9,00	467	15,00	195
0,20	1202	4,00	819	10,00	414	16,00	166
0,50	1167	5,00	736	11,00	365	17,00	142
1,00	1112	6,00	660	12,00	312	18,00	122
1,50	1058	7,00	590	13,00	267	19,00	104
						20,00	89
						21,00	76

на нижней и верхней границе  $i$ -го слоя;  $h_i$  — толщина  $i$ -го слоя воздуха;  $g_0$  — ускорение силы тяжести на соответствующих широтах;  $b_i$  — вертикальный градиент температуры, взятый с обратным знаком.

В представленных моделях атмосферы предполагается, что плотность воздуха в каждом  $i$ -м слое изменяется с высотой по закону [8]

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_{0i}}{T_i} \cdot e^{-a_i h_i}. \quad (4)$$

Для сравнения приведем основные характеристики моделей атмосферы [11] и [8], из которых модель из работы [11] соответствует стандартной атмосфере Земли в целом, а модель из работы [8] построена А. И. Нефедьевой на основе материалов аэрологических наблюдений над территорией СССР, дифференцированных по сезонам и широтам.

\* Атмосфера над Антарктидой, особенно над ее внутренним континентальной зоной, характеризуется крайне низким значением абсолютной влажности. Как показали расчеты, ее неучет при вычислении плотности воздуха по формуле (1) вызывает погрешность в индексе преломления порядка  $1-2 \times 10^{-6}$ .

Сопоставление данных, приведенных в табл. 1—5, позволяет сделать следующие выводы:

1. Глобальная (стандартная) модель земной атмосферы сохраняет существенное различие с региональными моделями атмосферы для Антарктиды (см. табл. 1—3) на всем диапазоне высот 0...20 км.

Таблица 4  
Модель атмосферы для широты  $\varphi=65^\circ N$  [8]

$H$ , км	Июль, $T_0=289$ К $P_0=1011$ мб		$H$ , км	Январь, $T_0=262$ К, $P_0=1012$ мб	
	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$a$		$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$a$
0	1214	0,10764	0	1347	0,14117
1,40	1050	0,13165	1,31	1142	0,11356
2,92	892	0,12740	2,73	966	0,15321
5,42	676	0,14040	5,11	732	0,15082
9,02	451	0,14860	8,47	482	0,15944
11,73	310	0,15049	10,97	326	0,15006
16,40	154	0,16896	15,24	162	0,13311
20,60	77		20,60	82	

2. Модели атмосферы из работы [8] не согласуются с сезонными моделями для Антарктиды (см. табл. 1, 2, 4, 5) до высот 17...18 км. Особенно велики расхождения в значениях величин  $a$ , характеризующих скорость изменения плотности воздуха с высотой, а следовательно, и закон изменения температуры воздуха с высотой.

Таблица 5  
Модель атмосферы для широты  $\varphi=80^\circ N$  [8]

$H$ , км	Июль, $T_0=274$ К $P_0=1012$ мб		$H$ , км	Январь, $T=258$ К $P_0=1008$ мб	
	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$a$		$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	$a$
0	1284	0,12640	0	1362	0,13698
1,40	1081	0,12302	1,31	1168	0,14579
2,92	910	0,13231	1,73	993	0,13687
5,42	687	0,14053	5,11	748	0,15404
9,02	457	0,14948	8,47	486	0,16106
11,73	303	0,14757	10,97	329	0,16113
16,40	151	0,15940	15,24	168	0,12910
20,60	75		20,60	85	

3. Сезонные и среднегодовые модели атмосферы для Антарктиды различаются между собой, особенно в отношении величин  $a$ .

4. Модели I и II совпадают лишь начиная с высот 6...9 км; особенно велики их различия на высотах до 5 км.

5. Выполненные исследования позволяют утверждать, что для практических расчетов астрономической рефракции в условиях Антарктиды необходимо пользоваться моделью атмосферы, удовлетворяющей следующим условиям:

- а) основой модели должны служить материалы аэрологоческих наблюдений в Антарктиде;
- б) для каждого сезона должна быть построена своя модель отдельно для прибрежной и континентальной зон.

**Список литературы:**

1. Вайцекян В. И. Об астрономических определениях в Антарктиде. — ОНТИ ЦНИИГАиК, 1972, № 18.
2. Василенко Н. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные первые годы. — Астрономия и астрофизика, 1972, вып. 17.
3. Дубовской Б. Лазарев Г. Е. Применение методов геодезии и аэрофотосъемки при исследовании Антарктиды. — В сб.: Основные итоги изучения Антарктики за 10 лет. М., 1967.
4. Заблоцкий Ф. Д., Киричук В. В. Экспериментальные исследования астрономической рефракции на больших зенитных расстояниях в Заполярье. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1976, вып. 5.
5. Каверзnev К. М., Лазарев Г. Е. Решение треугольника со стороной, склоненной рефракцией. — В кн.: Антарктика, М., 1967.
6. Колчинский И. Рефракция света в земной атмосфере. — Киев: Наукова думка, 1977.
7. Лазарев Г. Е. Методы определения астрономических координат и просы наземной навигации в Антарктиде. — М.: Наука, 1977.
8. Недьева А. И. Астрономическая рефракция. — Изв. АОЭ, 1973, вып. 40, ч. 9.
9. Прилепин М. Т. Современное состояние и перспективы развития инструментальных методов определения геодезической рефракции. — В сб.: Современные методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях. Львов, 1970.
10. Справочник по климату Антарктиды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977, том. 12.
11. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. — М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1956.
12. Тверской П. Н. Курс метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
13. Тверской П. Н. Курс метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
14. — Тр. Советской антарктической экспедиции. Л., Морской транспорт, 1960, т. 14, кн. 1.
15. Тр. Советской антарктической экспедиции. Л.: Морской транспорт, 1962, т. 25, кн. 2—3.
16. Шпицберг И. П. Таблицы рефракции для Арктики и Антарктики. — В. кн.: Тр. 15-й астрометр. конференции СССР. К., 1963.
17. Albright J., Clapp J. Evolution of Antarctic Star observations. — Journ. Surv. and Mapp. Div., 1968, 94, N 2.
18. Ephemerides astronomiques pour l'An. 1971. Bureau des Long., Paris, 1970.
19. Garfinkel J. Astronomical refraction in polytropic atmosphere. — Astron. Journ., 1967, N 1347.
20. Johnson G., Clapp J. Reliability of refraction in polar navigation. — Journ. Surv. and Mapp. Div., 1971, 97, N 2.

Работа поступила в редакцию 29 января 1979 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.