

## ВЛИЯНИЕ ДЛИН СВЕТОВЫХ ВОЛН НА АСТРОНОМИЧЕСКУЮ РЕФРАКЦИЮ

Астрономическую рефракцию вычисляют для заданного зенитного расстояния обычно по температуре, ее градиенту и давлению, измеренным в месте наблюдений. Но, как известно, рефракция связана с показателем преломления воздуха, который обусловлен не только метеорологическими параметрами, но и длиной волны колебаний. Поэтому мы провели исследования с целью оценки предельного влияния дисперсии света на угол астрономической рефракции.

Для этой цели определяли углы рефракции для монохроматического излучения с длинами волн 420 и 640 нм, которые ограничивают видимый участок спектра. Определение угла рефракции проводилось по методике Рамзайера [5]. Выбор методики объясняется тем, что в ней используется показатель преломления воздуха. Это позволило выявить влияние длины волны световых колебаний на значение астрономической рефракции. В основе методики лежит предположение, что поверхности равных показателей преломления представляют собой концентрические сферы с центром, совпадающим с центром земного шара. Исходная формула угла рефракции, применяемая Рамзайером, имеет вид

$$R = \operatorname{tg} z \int_{n_0}^{n_1} (1 - S) d\left(\frac{n_0}{n}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^3 z \int_{n_0}^{n_1} d\left(\frac{n_0}{n}\right) + \\ + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^3 z \int_{n_0}^{n_1} (1 - S) \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 d\left(\frac{n_0}{n}\right) - \operatorname{tg}^3 z \int_{n_0}^{n_1} S \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 d\left(\frac{n_0}{n}\right). \quad (1)$$

Здесь  $R$  — угол рефракции;  $n_0$  — показатель преломления воздуха в точке стояния наблюдателя;  $n_1$  — показатель преломления на верхней границе атмосферы;  $(1 - S) = \frac{a}{r}$ , где  $a$  — радиус сферы, на которой находится наблюдатель;  $r$  — радиус сферы с показателем преломления, равным  $n$ . Рамзайер обозначил превышение сферы с показателем преломления  $n$  над сферой с показателем преломления  $n_0$  через  $h$ . Тогда

$$r = a + h \text{ и } S \approx h/a. \quad (2)$$

Выразив угол рефракции в угловой мере и с учетом (2), формулу (1) приводим к виду

$$R = \rho'' (n_0 - 1) \operatorname{tg} z - \operatorname{tg} z \frac{\rho''}{a} \int_{n_0}^{n_1} h d\left(\frac{n_0}{n}\right) + \frac{1}{2} \rho'' (n_0 - 1)^2 \operatorname{tg}^3 z -$$

$$- \operatorname{tg}^3 z \frac{\rho''}{a} \int_{n_0}^{n_1} h d \left( \frac{n_0}{n} \right). \quad (3)$$

Эта формула, как и (1), дает возможность вычислить углы рефракции при зенитных расстояниях не больше  $80^\circ$ .

В формуле (3) заменим интегралы суммами:

$$\int_{n_0}^{n_1} h d \left( \frac{n_0}{n} \right) = \sum_{n_0}^{n_1} \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i, \quad (4)$$

где  $\bar{h}_i$  средняя высота  $i$ -го слоя над уровнем моря, а  $\Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i = \frac{n_0}{n_i} - \frac{n_0}{n_{i-1}}$ . Здесь  $n_i$  — показатель преломления на верхней границе  $i$ -го слоя;  $n_{i-1}$  — показатель преломления на нижней границе этого слоя. Таким образом, формула (3) имеет такой вид:

$$R = \rho'' (n_0 - 1) \operatorname{tg} z - \operatorname{tg} z \frac{\rho''}{a} \sum_{n_0}^{n_1} \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i + \frac{1}{2} \rho'' (n_0 - 1)^2 \operatorname{tg}^3 z - \\ - \operatorname{tg}^3 z \frac{\rho''}{a} \sum_{n_0}^{n_1} \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i. \quad (5)$$

Вычисления проводились для наблюдений, выполняемых с поверхности земли на уровне моря. Тогда  $a$  равно радиусу Земли, т. е. 6370 км.

Для определения  $R$  по формуле (5) нужно иметь значения показателя преломления атмосферы на разных высотах над уровнем моря. Для вычисления их кроме длин волн света необходимы температура, давление и влажность воздуха на краях слоев. Температура и давление атмосферы определены по данным стандартной атмосферы США [4], а влажность — по закономерности ее изменения, полученной Зюрингом и Хргианом. При этом предположено, что на уровне моря температура воздуха равна  $15^\circ$ , давление 760 мм рт. ст. и влажность 5 мм рт. ст. [1].

Расчеты проведены для слоев толщиной 0,5 км от уровня моря до высоты 32 км. А от 32 км до 47 км толщина слоев считалась равной 1 км. При этом использованы формула дисперсионной зависимости Зельмейера в форме Коши и формула зависимости показателя преломления воздуха от метеорологических условий Сирса и Баррела [3]. Полученные показатели преломления приведены в табл. 1. Для колебаний с  $\lambda = 420$  нм,  $n_0 = 1,0002815$ , а для колебаний с  $\lambda = 640$  нм,  $n_0 = 1,00026317$ . Кроме того, в табл. 1 имеются величины  $\Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i$ .

Значения показателя преломления и величин  $\Delta(n_0/n)_i$ 

H, км	$\lambda=420$ нм		$\lambda=640$ нм	
	$n_i$	$\Delta(n_0/n)_i$	$n_i$	$\Delta(n_0/n)_i$
1	2	3	4	5
0	1,000281494		1,000276150	
0,5	268263	0,000013227	263173	0,000012974
1	255509	12751	250663	12507
1,5	243218	12289	238606	12054
2	231384	11832	226998	11606
2,5	219992	11390	215823	11173
3	209036	10955	205075	10746
3,5	198495	10540	194734	10340
4	188366	10128	184798	0,000009935
4,5	178635	0,000009730	175252	9545
5	169264	9340	166088	9169
5,5	160366	8928	157330	8752
6	151727	8639	148854	8476
6,5	143484	8243	140767	8087
7	135586	7898	133020	7747
7,5	128027	7559	125603	7417
8	120793	7234	118506	7097
8,5	113874	6919	111789	6787
9	107267	6607	105237	6482
9,5	100951	6317	1,000099040	6197
10	1,000094929	6022	93132	5908
10,5	89181	5749	87493	5639
11	83710	5472	82125	5369
11,5	77364	6347	75900	6226
12	71496	5869	70143	5758
12,5	66077	5420	64826	5318
13	61067	5011	59911	4916
13,5	56433	4635	55365	4547
14	52156	4278	51169	4197
14,5	48201	3956	47289	3881
15	44547	3655	43704	3586
15,5	41169	3379	40390	3315
16	38048	3122	37328	3063
16,5	35164	2885	34498	2831
17	32501	2664	31886	2613
17,5	30035	2467	29467	2420
18	27757	2279	27232	2236
18,5	25651	2106	25166	2066
19	23709	1942	23260	1906
19,5	21909	1800	21494	1766
20	20247	1662	19864	1630
20,5	18678	1569	18324	1540
21	17224	1454	16898	1426
21,5	15886	1338	15586	1312
22	14658	1228	14380	1206
22,5	13528	1130	13272	1108
23	12485	1043	12249	1023
23,5	11525	0,000000960	11307	0,000000942
24	10642	883	10440	867
24,5	1,00009772	870	1,00009587	853
25	9076	696	8904	683
25,5	8387	689	8228	676
26	7772	615	7625	603
26,5	7162	610	7026	599

1	2	3	4	5
27	6621	541	6495	531
27,5	6120	501	6004	491
28	5659	461	5552	452
28,5	5234	425	5135	417
29	4839	395	4747	388
29,5	4478	361	4394	353
30	4143	335	4065	329
30,5	1,000003833	0,000000310	1,000003760	0,000000305
31	3548	285	3481	279
31,5	3287	261	3225	256
32	3042	245	2984	241
33	2589	453	2540	444
34	2212	377	2170	370
35	1888	324	1853	317
36	1617	271	1586	267
37	1387	230	1361	225
38	1193	194	1170	191
39	1028	165	1009	161
40	1,000000885	143	1,000000868	141
41	766	119	751	117
42	662	0,000000104	649	102
43	572	0,000000090	562	0,000000087
44	497	75	488	74
45	431	66	423	65
46	379	52	372	51
47	328	51	321	51

$$\Sigma \bar{h}_i \Delta (n_0/n)_i = 0,002359162$$

$$\Sigma \bar{h}_i \Delta (n_0/n)_i = 0,002314126$$

В результате вычислений для колебаний с  $\lambda = 420$  нм получено:

$$\rho'' (n_0 - 1) = 58,062350'', \quad \frac{1}{2} \rho'' (n_0 - 1)^2 = 0,008172'',$$

$$\rho''/a = 32,380691'', \quad \Sigma \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i = 0,0023592,$$

$$\frac{\rho''}{a} \Sigma \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i = 0,0763913''.$$

Угол рефракции  $R_{420} = 58,062360'' \operatorname{tg} z - 0,0763913'' \operatorname{tg} z + 0,008172'' \operatorname{tg}^3 z - 0,0763913'' \operatorname{tg}^3 z$ , или  $R_{420} = 57,98597'' \operatorname{tg} z - 0,068219'' \operatorname{tg}^3 z$ .

Для колебаний с  $\lambda = 640$  нм:

$$\rho'' (n_0 - 1) = 56,960080'', \quad \frac{1}{2} \rho'' (n_0 - 1)^2 = 0,007865'',$$

$$\rho''/a = 32,380691'', \quad \Sigma \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i = 0,0023141,$$

$$\frac{\rho''}{a} \Sigma \bar{h}_i \Delta \left( \frac{n_0}{n} \right)_i = 0,0749330''.$$

Угол рефракции  $R_{640} = 56,960080'' \operatorname{tg} z - 0,0749330'' \operatorname{tg}^3 z + 0,007865'' \operatorname{tg}^3 z - 0,0749330'' \operatorname{tg}^3 z$ , или  $R_{640} = 56,885147'' \operatorname{tg} z - 0,067068'' \operatorname{tg}^3 z$ .

В табл. 2 приведены вычисленные по формуле (5) углы рефракции для колебаний с  $\lambda = 420$  нм и  $\lambda = 640$  нм для ряда зе-

Таблица 2

Углы астрономической рефракции

$z$	$R_{420}$	$R_{640}$	$\Delta R$	$R$ (по Кассини)
5	5,07	4,98	0,09	5
10	10,23	10,03	0,20	10
15	15,54	15,24	0,30	16
20	21,10	20,70	0,40	21
25	27,03	26,52	0,51	27
30	33,46	32,83	0,63	34
35	40,58	39,81	0,77	41
40	48,62	47,69	0,92	50
45	57,92	56,82	1,10	59
50	68,99	67,68	1,31	70
55	88,61	81,05	1,57	83
60	100,08	98,18	1,90	102
65	123,68	121,33	2,35	126
70	157,90	154,90	3,00	159
75	212,86	208,81	4,05	218
80	316,41	310,38	6,03	328
82	388,02	380,60	7,42	407
84	492,94	483,46	9,48	615
86	629,72	617,35	12,37	768

нитных расстояний. Там же имеются разности  $\Delta R = R_{420} - R_{640}$ , которые характеризуют предельное влияние дисперсии света на угол рефракции. Для сравнения даны углы рефракции, взятые из таблиц Кассини [2].

Как видим, длина волны световых колебаний при малых зенитных углах слабо влияет на угол рефракции. Но уже при зенитном расстоянии, равном  $40^\circ$ , это влияние может достигать  $1''$ . Особенно сильное влияние дисперсии при больших зенитных расстояниях. При  $z > 80^\circ$  ее влияние составляет около  $10''$ .

1. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии (Физика атмосферы). М., 1976. С. 638.
2. Нефедьева А. И. Астрономическая рефракция // Изв. Астр. обсерватории им. Энгельгардта. 1968. № 36. С. 14—18.
3. Фрум К., Эссен Л. Скорость света и радиоволн. М., 1973.
4. Zaurila S. H. Electronic surveying and navigation. New York, 1975.
5. Ramsayer K. Über die Genauigkeit der Bestimmung der astronomischen Refraktion // Acta technica academiase scientiarum Hungarica, 1965. Bd. 52. S. 31—50.