

УДК 520.2+520.8+535.24

Исследование астроклимата и оптики 2-м телескопа на пике Терскол

Г. З. Бутенко¹, В. И. Кузнецов¹, Л. И. Снежко³, А. В. Сергеев¹,
В. Н. Андрук², В. Г. Парусимов², Т. Б. Дудник², Ю. С. Иванов²

¹Международный центр астрономических и медико-экологических исследований
Национальной академии наук Украины и Российской академии наук
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

²Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

³Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
357147, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз

На основании дополнительного обширного наблюдательного материала, полученного после промывки зеркал, продува подкупольного помещения и трубы 2-м телескопа, проведена окончательная аттестация оптики телескопа в фокусе Кассегрена на пике Терскол. После исключения аберраций (кома, астигматизм, сферическая аберрация) можно достичь значения величины диаметра кружка рассеяния, равного $d_{0.8} = 0.60''$ (при 80 % концентрации энергии). Анализ обработки гартманнограмм показал, что с целью улучшения качества изображения и увеличения проникающей силы 2-м телескопа необходимо провести соответствующие юстировочные работы по исправлению комы. В системе без корректора астигматизма параметры комы составляют $F_x = 7.34 \pm 0.83$ мм и $F_y = -3.94 \pm 0.37$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ мм и $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ мм. При этом остаются незначительные аберрации, которые объясняются эффектом гнутия трубы 2-м телескопа. В системе с корректором астигматизма параметры комы принимают значения $F_x = 8.13 \pm 2.50$ мм и $F_y = -4.25 \pm 1.50$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.38 \pm 0.42$ мм и $\Delta Y = -0.73 \pm 0.56$ мм.

ДОСЛІДЖЕННЯ АСТРОКЛІМАТУ ОПТИКИ 2-М ТЕЛЕСКОПА НА ПІКУ ТЕРСКОЛ, Бутенко Г. З., Кузнецов В. І., Снежко Л. І., Сергєєв О. В., Андрук В. М., Парусімов В. Г., Дудник Т. Б., Іванов Ю. С. — На основі додаткового обширного спостережного матеріалу, одержаного після промивання дзеркал, продування підкупольного приміщення і труби 2-м телескопа, проведена кінцева атестація оптики телескопа у фокусі Кассегрена на піку Терскол. Після виділення аберрацій (кома, астигматизм, сферична аберрація) можна досягти значення величини діаметра кільця розсіяння, рівного $d_{0.8} = 0.60''$ (при 80 % концентрації енергії). Аналіз обробки гартманнограм показав, що з метою покращення якості зображення і збільшення проникаючої сили 2-м телескопа необхідно провести

відповідні юстирувальні роботи з виправлення коми. В системі без коректора астигматизму параметри коми складають $F_x = 7.34 \pm 0.83$ мм і $F_y = -3.94 \pm 0.37$ мм, що відповідає зсувам $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ мм і $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ мм. При цьому залишаються незначні аберації, які пояснюються ефектом гнуття труби 2-м телескопа. В системі з коректором астигматизму параметри коми приймають значення $F_x = 8.13 \pm 2.50$ мм і $F_y = -4.25 \pm 1.50$ мм, що відповідає зсувам $\Delta X = 1.38 \pm 0.42$ мм і $\Delta Y = -0.73 \pm 0.56$ мм.

INVESTIGATION OF THE SEEING AND THE OPTICS OF THE TWO-METER TELESCOPE OF THE TERSKOL PEAK OBSERVATORY, by Butenko G. Z., Kuznetsov V. I., Snezhko L. I., Andruk V. M., Parysimov V. G., Sergeev A. V., Ivanov Yu. S. — The investigation of the Cassegrain focus optics of the two-meter telescope of the Terskol Peak was completed after additional observations were made on washing the mirrors and blowing through the telescope tube. The image size $d_{0.8} = 0.60''$ (80 % energy concentration) can be reached after the elimination of aberration. An analysis of Shack-Gartmann images showed that the coma should be eliminating to refine the image quality and to increase the telescope resolution. At the system without correction of astigmatism, the coma parameters are $F_x = 7.34 \pm 0.83$ mm and $F_y = -3.94 \pm 0.37$ mm, that correspond to the shift $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ mm and $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ mm. Insignificant aberrations caused by the flexure of the telescope tube still remain in this case. With a system of astigmatism correction, the coma parameters are $F_x = 8.13 \pm 2.50$ mm and $F_y = -4.25 \pm 1.50$ mm, that correspond to the shift $\Delta X = 1.38 \pm 0.42$ mm and $\Delta Y = -0.73 \pm 0.56$ mm.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает программу Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН и Международного центра астрономических и медико-экологических исследований (МЦ АМЭИ) НАН Украины и РАН по исследованию оптики 2-м телескопа системы Ричи—Кретьена на пике Терскол (Кабардино-Балкарская республика) [5] и изучению астроклимата внутри башни. Ее задача состоит в том, чтобы в улучшенных условиях наблюдений (после промывки зеркал, продува подкупольного помещения и трубы) уточнить оптические характеристики телескопа и дать окончательные рекомендации для юстировочных работ.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В основу выполненной работы были положены специальные наблюдения с 16 по 23 июля 1999 г., выполненные с диафрагмой Гартманна ($D = 1.93$ м, 156 отверстий диаметром $d = 63.6$ мм, шаг по координатам $l = 120$ мм). Диафрагма крепилась на трубе телескопа [5]. В режиме работы со слабощувствительной черно-белой фотопленкой («Фото-32», «Свема-64» или ORWO-100) экспонировались звезды α Lyr ($V = 0.03^m$, $Sp = A0V$), γ Cyg ($V = 2.20^m$, $Sp = F8I$) или α Aql ($V = 0.76^m$, $Sp = A7IV-V$) [3]. Экспозиции, как правило, составляли 40—50 с. Использовался фотоаппарат «Зенит-Е», который крепился в фокусе Кассегрена. Наблюдения проводились до, после и во время продува трубы телескопа. Экспозиции делались с коректором астигматизма и без него на расстояниях $r = 0$, $r = 12.5'$ и $r = 25.0'$ от оптической оси при разных положениях f вторичного зеркала. Во все ночи наблюдений поочередно делались предфокальные (i) и зафокальные (e) снимки изображений диафрагмы Гартманна при разных положениях рота-

Таблица 1. Характеристики полученных гартманнограмм

N	T_{exp} , с	f, мм	r	φ , град	z, град	A, град	t	Примечание
16/17.07.99 г. Наблюдения γ Суг без корректора астигматизма								
1i	40	38.16	0'	90	26.4	69.3	2 ^h 22 ^m	
2i	45	38.16	0	90	26.6	70.0	2 23	
3i	50	38.16	0	90	26.9	70.6	2 24	
4e	40	38.16	0	90	28.0	73.0	2 31	
5e	45	38.16	0	90	28.4	74.0	2 32	
6e	50	38.16	0	90	28.8	75.0	2 33	
7e	40	38.16	0	90	29.1	75.5	2 37	
8e	45	38.16	0	90	29.3	76.0	2 38	
9e	50	38.16	0	90	29.5	76.3	2 39	
17/18.07.99 г. Наблюдения α Луг без корректора астигматизма								
10e	0.2	38.63	0	90	5.8	292	0 21	До продува трубы
11e	0.2	38.63	0	90	5.8	292	0 22	"-
12e	20	38.63	0	90	6.0	298	0 24	"-
13e	20	38.63	0	90	6.4	300	0 25	"-
14e	0.2	38.63	0	90	9.0	306	0 45	После 15-мин продува трубы
15e	0.2	38.63	0	90	9.0	306	0 45	"-
16e	20	38.63	0	90	10.0	309.5	0 48	"-
17e	20	38.63	0	90	10.3	311.0	0 49	"-
γ Суг								
18e	40	38.63	0	90	8.6	274	23 17	
19e	45	38.63	0	90	8.0	270.6	23 19	
20i	40	38.63	0	90	8.0	270.9	23 20	
21i	45	38.63	0	90	7.5	271.0	23 22	
22i	40	35.63	0	90	7.1	272.0	23 25	
23i	45	35.63	0	90	6.9	272.2	23 27	
24e	40	35.63	0	90	6.3	272.9	23 29	
25e	45	35.63	0	90	6.0	273.2	23 31	
26e	40	32.92	0	90	5.2	274.3	23 37	
27e	45	32.92	0	90	4.9	274.7	23 39	
28e	40	33.92	0	90	4.7	274.9	23 40	
29e	45	33.92	0	90	4.5	275.3	23 42	
30i	40	38.63	0	90	4.1	275.8	23 44	
31i	45	38.63	0	90	4.0	276.0	23 45	
32i	40	38.63	0	0	12.2	318.1	1 04	
33i	45	38.63	0	0	12.5	321.0	1 05	
34e	40	38.63	0	0	12.7	323.0	1 07	
35e	45	38.63	0	0	13.0	325.6	1 08	
36e	60	38.63	0	0	25.7	67.4	2 18	
37e	45	38.63	0	0	26.1	68.5	2 20	
38e	50	38.63	0	0	26.4	69.3	2 22	
39i	40	38.63	0	0	26.7	70	2 24	
40i	45	38.63	0	0	27.0	70.7	2 25	
18/19.07.99 г. Наблюдения γ Суг без корректора астигматизма								
41e	40	38.40	0	0	27.7	255.5	21 31	
42e	45	38.40	0	0	27.7	255.7	21 32	
43i	40	38.40	0	0	23.3	258.7	21 55	
44i	45	38.40	0	0	22.8	259.0	21 58	
45i	40	38.40	12.5	0	14.8	264.7	22 42	
46i	45	38.40	12.5	0	14.3	265.0	22 44	
47e	40	38.40	12.5	0	12.2	266.8	22 56	
48e	45	38.40	12.5	0	11.9	267.0	22 57	
49e	40	38.40	12.5	90	3.7	274.9	23 45	
50e	45	38.40	12.5	90	3.5	275.3	23 47	
51i	40	38.40	12.5	90	3.2	275.8	23 49	
52i	45	38.40	12.5	90	3.0	276.2	23 51	
53i	40	38.40	12.5	180	4.7	286.1	0 20	
54i	45	38.40	12.5	180	4.5	286.7	0 22	
55e	40	38.40	12.5	180	5.3	287.6	0 24	
56e	45	38.40	12.5	180	5.6	288.3	0 26	
57e	40	38.40	12.5	270	21.9	49.7	1 56	
58e	45	38.40	12.5	270	22.2	51.5	1 58	
59i	40	38.40	12.5	270	22.6	53.5	2 00	
60i	45	38.40	12.5	270	23.0	55.2	2 02	

Продолжение табл. 1

N	T _{exp} , °C	f, мм	r	φ, град	z, град	A, град	t	Примечание
61i	40	38.40	0	270	24.2	62.4	2 10	
62i	45	38.40	0	270	24.5	63.4	2 11	
63e	40	38.40	0	270	24.9	64.6	2 13	
64e	45	38.40	0	270	25.2	65.6	2 15	
20/21.07.99 г. Наблюдения γ Суг без корректора астигматизма								
65e	45	38.40	0	270	5.8	289.1	0 27	
66e	50	38.40	0	270	6.1	289.9	0 29	
67i	45	38.40	0	270	6.5	291.0	0 31	
21/22.07.99 г. Наблюдения γ Суг без корректора астигматизма								
68i	50	38.44	0	270	5.2	287.4	0 23	
69i	45	38.44	25.0	270	9.3	298.3	0 49	
70i	50	38.45	25.0	270	9.6	299.6	0 51	
71e	45	38.45	25.0	270	10.7	305.3	0 57	
72e	50	38.45	25.0	270	11.0	307.1	0 58	
73e	45	38.44	25.0	90	16.1	357.4	1 24	
74e	50	38.44	25.0	90	16.4	0.7	1 26	
75i	45	38.44	25.0	90	17.1	8.2	1 30	
76i	50	38.44	25.0	90	17.4	11.7	1 32	
77i	50	38.44	25.0	180	19.7	37.8	1 45	
78i	45	38.44	25.0	180	20.1	39.7	1 47	
79e	45	38.44	25.0	180	21.0	46.2	1 52	
80e	50	38.44	25.0	180	21.4	48.8	1 54	
81e	45	38.44	25.0	0	25.2	65.7	2 15	
82e	50	38.44	25.0	0	25.5	66.6	2 17	
83i	45	38.44	25.0	0	25.9	67.8	2 19	
84i	50	38.44	25.0	0	26.2	68.7	2 21	
85i	45	38.44	12.5	0	28.7	74.5	2 34	
86i	50	38.44	12.5	0	29.0	75.2	2 36	
87e	45	38.44	12.5	0	29.4	75.9	2 38	
88e	50	38.44	12.5	0	29.7	76.5	2 40	
89e	45	38.44	0	0	30.1	77.2	2 42	
90e	50	38.44	0	0	30.4	77.8	2 44	
91i	45	38.44	0	0	30.8	78.5	2 46	
92i	50	38.44	0	0	31.1	79.0	2 48	
93i	45	38.44	0	90	32.8	81.5	2 58	Продув трубы во время съемки
94i	50	38.44	0	90	33.1	82.0	2 59	"-
95e	45	38.44	0	90	33.6	82.5	3 01	"-
96e	50	38.44	0	90	33.8	82.9	3 03	"-
α Aql								
97e	10	38.44	0	90	57.8	55.0	3 40	
98e	15	38.44	0	90	58.0	55.1	3 41	
99i	10	38.44	0	90	59.0	55.5	3 42	
100i	15	38.44	0	90	59.2	55.8	3 43	
22/23.07.99 г. Наблюдения γ Суг с корректором астигматизма								
101e	45	38.19	0	90	6.3	272.9	23 30	
102e	50	38.19	0	90	6.0	273.2	23 32	
103i	45	38.19	0	90	5.7	273.6	23 34	
104i	50	38.19	0	90	5.4	274.0	23 36	
105i	45	38.19	25.0	90	5.2	276.5	23 40	
106i	50	38.19	25.0	90	4.9	276.9	23 41	
107e	45	38.19	25.0	90	4.6	277.6	23 44	
108e	50	38.19	25.0	90	4.4	278.0	23 46	
109e	45	38.19	25.0	180	3.3	277.9	23 53	
110e	50	38.19	25.0	180	3.1	278.3	23 54	
111i	45	38.19	25.0	180	3.0	279.0	23 57	
112i	50	38.19	25.0	180	2.9	279.6	23 59	
113i	45	38.19	25.0	0	2.9	279.2	23 58	
114i	50	38.19	25.0	0	2.9	279.8	0 00	
115e	45	38.19	25.0	0	29.2	75.6	2 38	
116e	50	38.19	25.0	0	29.6	76.3	2 39	
117e	45	38.19	25.0	270	24.4	66.1	2 12	
118e	50	38.19	25.0	270	24.7	67.2	2 13	
119i	45	38.19	25.0	270	25.1	68.1	2 15	
120i	50	38.19	25.0	270	25.4	69.2	2 17	
121i	45	38.19	12.5	270	26.5	67.5	2 21	

Окончание табл. 1

N	T _{exp} , с	f, мм	r	φ , град	z, град	A, град	t	Примечание
122i	50	38.19	12.5	270	26.8	68.4	2 23	
123e	45	38.19	12.5	270	27.1	69.2	2 25	
124e	50	38.19	12.5	270	27.4	70.0	2 27	
125e	45	38.19	12.5	90	31.1	80.3	2 49	
126e	50	38.19	12.5	90	31.4	80.8	2 51	
127i	45	38.19	12.5	90	31.8	81.3	2 52	
128i	50	38.19	12.5	90	33.8	84.0	3 03	
129i	45	38.19	12.5	0	34.8	84.1	3 08	
130i	50	38.19	12.5	0	35.1	84.5	3 10	
131e	45	38.19	12.5	0	35.5	84.9	3 12	
132e	50	38.19	12.5	0	35.8	85.3	3 14	
133e	45	38.19	0	90	36.2	85.6	3 16	
134e	45	38.19	0	90	36.7	86.4	3 19	

тора телескопа $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, в разное время t на различных зенитных расстояниях z и азимутах A . Всего получено 134 гартманнограммы (табл. 1).

ИЗМЕРЕНИЕ АСТРОНЕГАТИВОВ

Измерения фотографических пленок было выполнено на автоматическом цифровом микрофотометре АЦМФ-ХУ [7, 8]. Негативы сканировались с пространственным разрешением 50×50 мкм при скорости 500 измерений за секунду в направлении, параллельном линиям зарегистрированных изображений отверстий диафрагмы Гартманна. Наш опыт обработки наблюдений за 1998 г. [1, 2] показал, что пространственного разрешения 50×50 мкм достаточно для получения неискаженных прямоугольных координат и инструментальных величин объектов (изображений отверстий диафрагмы Гартманна на фотопленке). В среднем размеры изображений составляли 200×200 пкл.

Оцифрованные фотометрические данные вводились в память компьютера (PC-386) автоматического комплекса АЦМФ-ХУ, где выполнялась их предварительная обработка. Производилась редукция данных с учетом дрейфа осветительно-измерительного тракта микрофотометра, устранялось «выбегание» строк сканирования. После преобразования в формат FITS [13] информация архивировалась. Дальнейшая обработка выполнялась на компьютере «Intel Pentium 166 MMX» при помощи программного фотометрического пакета MIDAS/ROMAFOT (European Southern Observatory — Image Processing Group 1991a, MIDAS. Users Guide. Volume A and B, ESO, Garching; Stetson P. B. and Image Processing Group — ESO 1991. DAOPHOT II — User Manual. Garching) под управлением операционной системы LINUX.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MIDAS/ROMAFOT

Для уменьшения погрешностей осветительно-измерительного тракта микрофотометра измерения негативов начиналось после предварительного двухчасового прогрева АЦМФ-ХУ. Особенностью полученных изображений диафрагмы было то, что уровень фона вне границ кольцевой зоны (местоположения отверстий) во много раз ниже, чем в пределах зоны между отверстиями. Это вносит специфические дополнительные трудности обработки, помимо дефектов эмульсии и т. п.). Кроме того, элементы крепления вторичного зеркала телескопа частично экранируют отдельные ряды отвер-

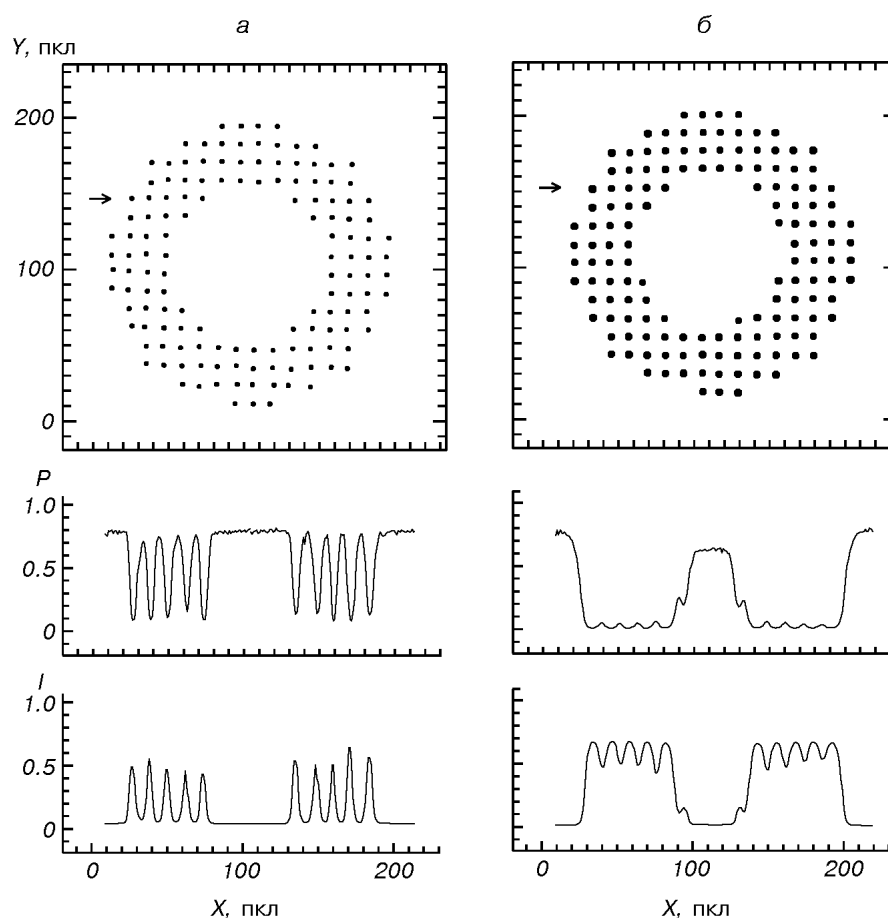


Рис. 1. Вид диафрагмы Гартманна после обработки снимков 15е, 16е в программном пакете MIDAS/ROMAFOT (вверху). Диаметры зачерненных кружков соответствуют шкале инструментальных величин ROMAFOT. Время экспонирования звезды α Луг 0.2 с (а) и 20 с (б). Ниже показаны исходные разрезы (P) и профили после искусственного растягивания динамического диапазона инструментальных фотометрических величин (I)

стей, что ведет к ослаблению некоторых изображений. Динамический диапазон плотности почернения фотоэмульсии для разных кадров расширился также из-за того, что использовались разные экспозиции от 0.2 до 50 с, разные по блеску звезды) и разные условия проявления в разные дни. Как показывает опыт [1, 2], без специальной предварительной обработки нельзя определить «инструментальные величины» и прямоугольные координаты полученных звездообразных объектов во всем динамическом интервале характеристической кривой фотоэмульсии.

Рассмотрим подробно способ предварительной коррекции оцифрованных изображений, с помощью которого обработан весь массив из 134 измеренных кадров. На рис. 1 показаны примеры двух разрезов снимков диафрагмы Гартманна, сделанных с экспозициями 0.2 и 20 с, после обработки в программном пакете MIDAS/ROMAFOT. Для экспозиции 0.2 с характерный большой разброс плотностей почернения центров изображений, значительное уклонение этих центров от прямой линии и четкое выделение объектов относительно вуали. На снимке с экспозицией 20 с изображения почти полностью перекрываются, и даже для внутренней

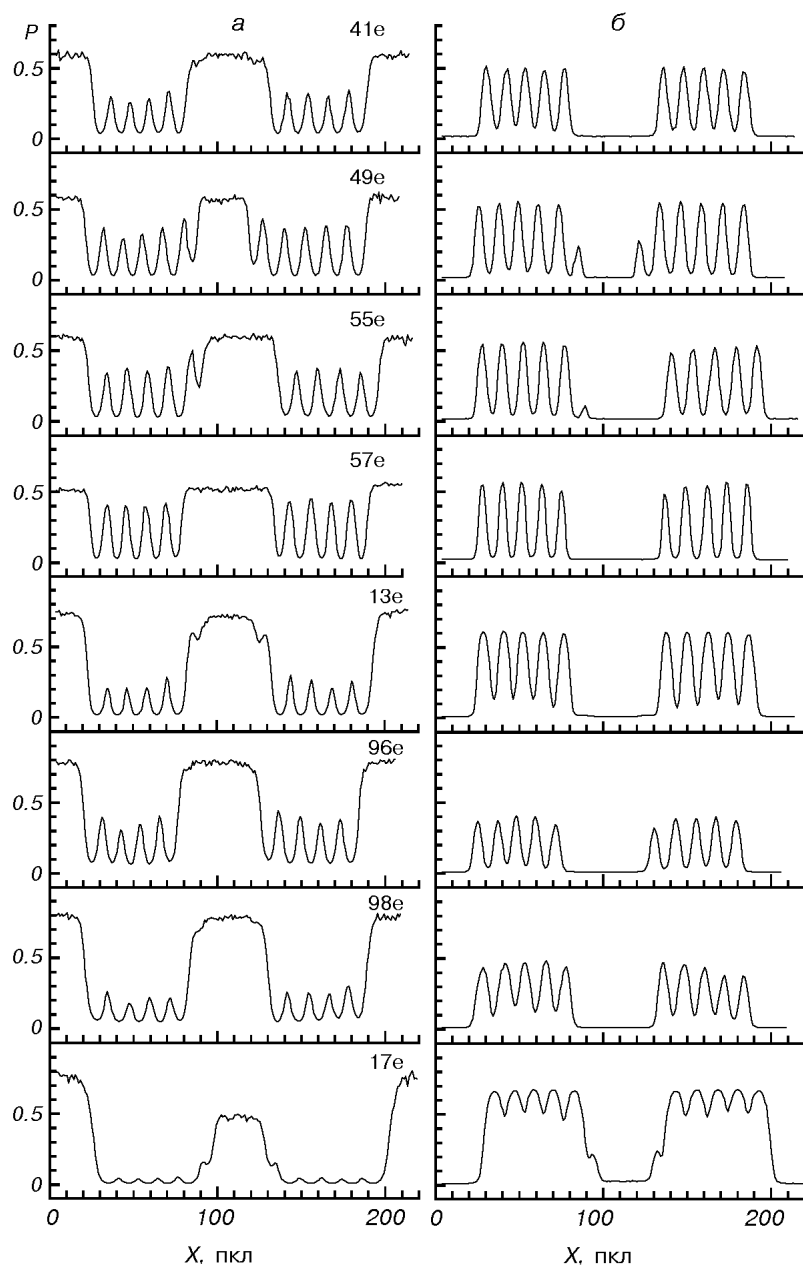


Рис. 2. Разрезы одного из рядов отверстий диафрагмы Гартманна: *a* — после сканирования на микрофотометре, *б* — после искусственного растягивания динамического диапазона. Снимки 41e, 49e, 55e и 57e — для четырех положений ротатора телескопа 0°, 90°, 180° и 270° соответственно; 13e — до, 96e, 98e — во время, 17e — после продува трубы телескопа

части (свободной от отверстий) характерен высокий уровень фона относительно внешней зоны диафрагмы. Чтобы привести каждое изображение к «звездообразному» виду, т. е. понизить уровень фона между объектами и внутри диафрагмы, ко всем оцифрованным изображениям с диафрагмой Гартманна применена процедура искусственного растягивания динамического диапазона инструментальных фотометрических величин, в результате которой уровень фона был понижен. Так как динамический диапазон

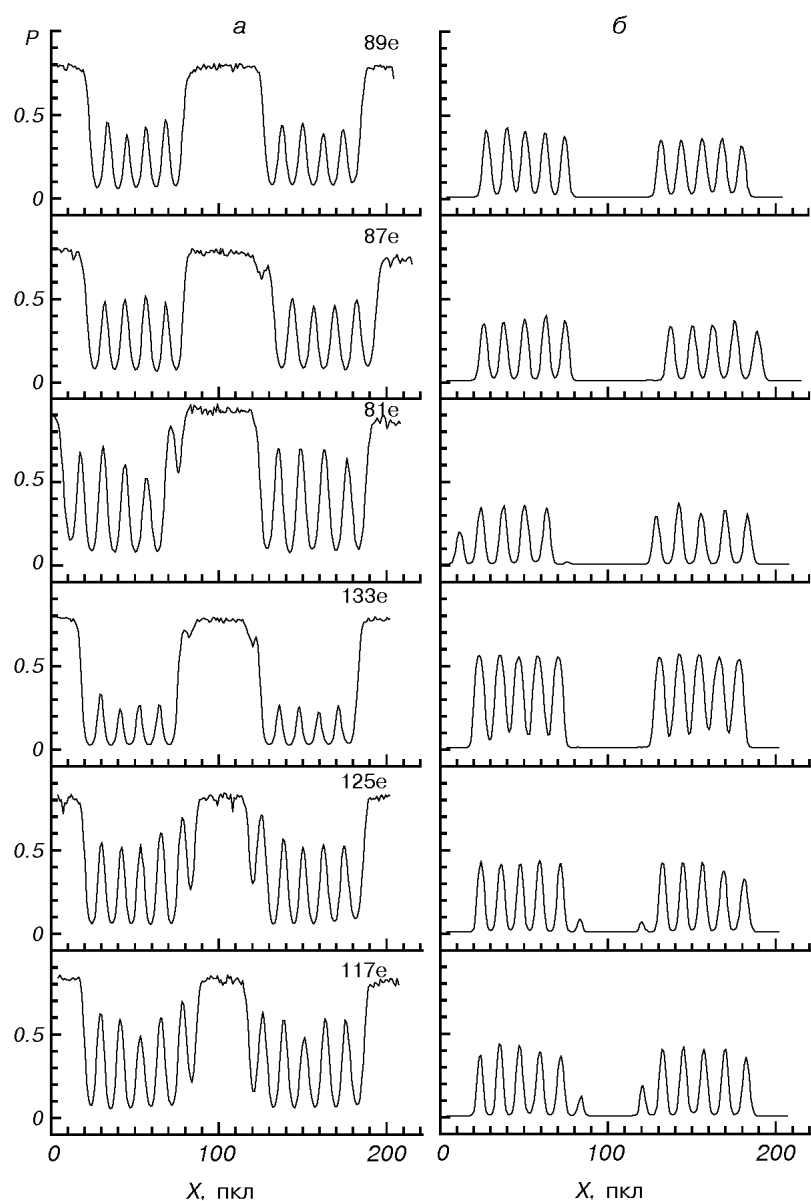


Рис. 2. (продолжение). Снимки 89е, 87е и 81е — для центрального и двух боковых отверстий $r = 12.5'$ и $25'$ — без корректора астигматизма, соответственно снимки 133е, 125е, 117е — с корректором астигматизма

регистрации пропускания микрофотометра ограничен значениями $P_{\min} = 0$ и $P_{\max} = 2047$, был сделан переход от величин пропускания к величинам почернения:

$$D'_{i,j} = D_{i,j}/n = (P_{\max} - P_{i,j})/n,$$

где $P_{i,j}$ и $D_{i,j}$ — величины пропускания и почернения для элемента изображения с прямоугольными координатами $X_i, Y_j, i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J$. После этого каждому элементу изображения присвоено новое значение относительно числа k :

$$D''_{i,j} = k^{D'_{i,j}}, \quad D'''_{i,j} = D''_{i,j}^{D'_{i,j}},$$

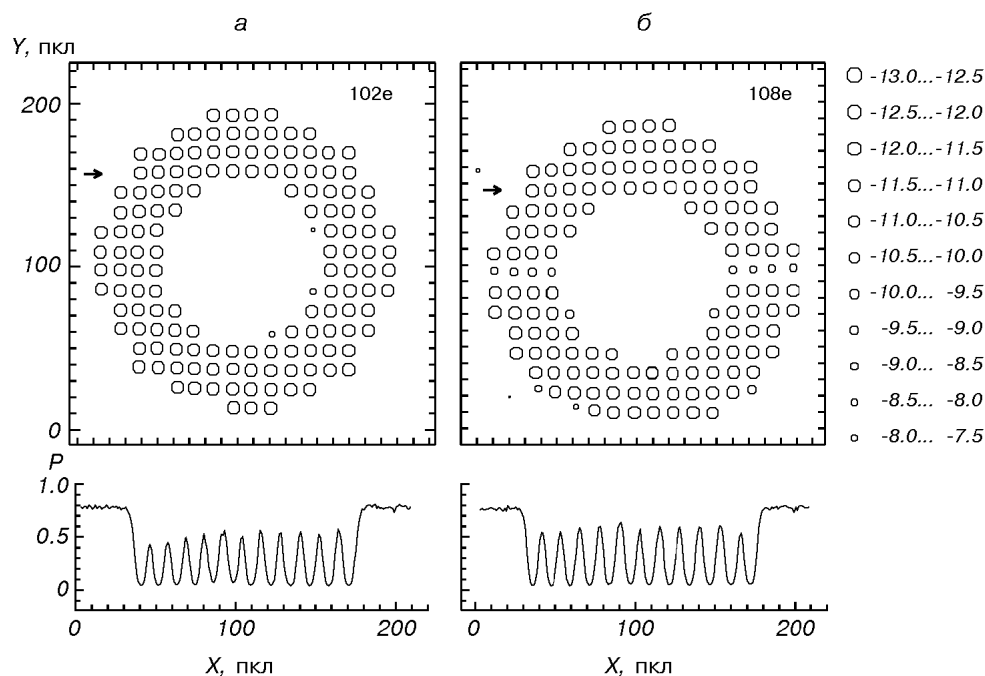


Рис. 3. Вид диафрагмы Гартманна после обработки снимков 102e (для центрального отверстия), 108e (на расстоянии $r = 25'$ от центра фланца) в программном пакете MIDAS/ROMAFOT. Внизу — разрезы рядов отверстий после сканирования на микрофотометре. Диаметры кружков (справа) соответствуют шкале инструментальных величин ROMAFOT

где n , k — масштабные множители (выбирались $n = P_{\max}$ и $P_{\max}/2$). Для крайнего случая, когда исходное изображение на фотопленке передержано, после соответствующей процедуры значения фона между отверстиями в результирующем изображении снизились на 20—30 % (рис. 1, б). Когда между объектами на исходном изображении пропускание составляет менее 20—50 % (рис. 2, а), в результирующем изображении значения фона между отверстиями и вне их уменьшаются и становятся одного порядка. Объекты на изображении достаточно четко выделяются над пониженным уровнем фона (рис. 2, б). Аналогичные способы искусственного растягивания динамического диапазона фотометрических величин авторы успешно использовали при обработке фотографических пластинок, наблюдений на ПЗС-матрицах и телевизионных устройствах. Они позволяют уверенно выделять все объекты, которые зарегистрированы на оцифрованном астрономическом изображении. Достаточно эффективно действие этого способа на шумы фотоэмульсии — при резком «проседании» фона отклонения относительно среднего значения уровня фона составляют несколько процентов. Далее полученные изображения были сглажены и отфильтрованы с помощью фильтров FILTER/MEDIAN и FILTER/SMOOSS из программного пакета MIDAS. Радиусы сглаживания составляли один или два пикселя, а фильтры использовались последовательно несколько раз. На этом предварительная обработка изображений заканчивалась, дальше в автоматическом режиме пакета ROMAFOT определялись прямоугольные координаты и инструментальные величины всех объектов. На рис. 3, а показан вид диафрагмы Гартманна (после обработки в ROMAFOT), когда снимок получали на оптической оси телескопа, а на рис. 3, б — на расстоянии $25'$ от оптической оси. Рядом приведена шкала инструментальных величин

ROMAFOT. Видна фотометрическая неравномерность по полю обработанных изображений, что иллюстрирует формирование дифракционной структуры.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ

После того как в программном пакете MIDAS были выделены объекты и снижен уровень фона, дальнейшая обработка велась в программном фотометрическом пакете ROMAFOT. Он позволяет из оцифрованных астрономических изображений получить инструментальные величины и прямоугольные координаты объектов. Обработка велась в автоматическом режиме, при этом в команде SKY/ROMAFOT пробные средние значения вуали фотоэмульсии вычислялись для четырех участков. Команда SEARCH/ROMAFOT использовалась для поиска объектов относительно переменного уровня фона эмульсии, а команды GROUP/ROMAFOT и FIT/ROMAFOT производили вычисления над изображениями с подобранными параметрами. Работа в программном пакете заканчивалась выполнением команды REGISTER/ROMAFOT, после нее при помощи команд MIDAS производилась новая регистрация данных в виде, пригодном для дальнейших статистических вычислений. Из опыта обработки изображений нам известно, что точность определения прямоугольных координат центров объектов не хуже 0.1 пкл, что вполне достаточно для дальнейших исследований.

Дальнейшая обработка материала проводилась методом совместной обработки двух гартманнограм, использованным в работе [5].

СИСТЕМА БЕЗ КОРРЕКТОРА АСТИГМАТИЗМА

Анализ изображений гартманнограмм, полученных в центре поля без корректора астигматизма (табл. 2), показал, что в волновом фронте есть все aberrации Зайделя 3-го порядка: кома, астигматизм и сферическая aberrация. Доминирует кома с амплитудой $A_{31} = 2.021 \pm 0.17$ мкм и фазой $\Phi_{31} = 119 \pm 3^\circ$. Результаты усреднялись по 10 парам гартманнограмм, снятых в разные ночи.

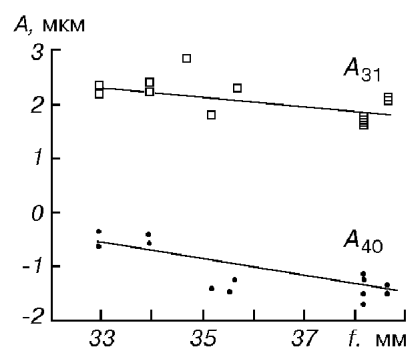
Методом восстановления волнового фронта, который применялся в работах [4, 9—11], получено распределение энергии точечного источника (табл. 2). Диаметр кружка рассеяния, содержащий 80 % энергии, составляет $d_{0.8} = 1.04 \pm 0.04''$. Последовательное исключение комы, астигматизма и всех aberrации приводит к значениям диаметров кружка рассеяния, равным $0.78 \pm 0.03''$, $0.80 \pm 0.01''$ и $0.60 \pm 0.04''$ соответственно, что практически совпадает с данными цеховой аттестации.

Таблица 2. Центр поля, $f=38.65$ мм. Система без корректора астигматизма. Результаты обработки снимков.

Номера снимков	$f_{\text{эф}}$, мм	$d_{0.8}$	$A_{40'}$, мкм	$A_{31'}$, мкм	$\Phi_{31'}$, град	$A_{22'}$, мкм	$\Phi_{22'}$, град	$d_{0.8}$ без aberrаций
(36—40)	16033 ±8	1.05" ±0.02"	—1.60 ±0.09	2.14 ±0.07	122 ±2	0.30 ±0.07	90 ±15	0.56±0.01"
(18—21)	16090 ±7	1.08 ±0.01	—1.36 ±0.06	2.13 ±0.02	120 ±4	0.25 ±0.17	150 ±20	0.66±0.03
(32—35)	16038 ±1	0.98 ±0.04	—1.81 ±0.10	1.78 ±0.15	115 ±3	0.52 ±0.10	122 ±1	0.57±0.005
Среднее	16054 ±25	1.04 ±0.04	—1.59 ±0.18	2.02 ±0.17	119 ±3	0.36 ±0.12	121 ±24	0.60±0.04

Таблица 3. Вариации aberrаций Зайделя в центре поля при изменении f в системе без корректора астигматизма

Номера снимков	f , мм	$f_{\text{эф}}$, мм	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град
(1—6)	38.16	16092 ± 1	-1.26 ± 0.12	1.71 ± 0.11	122 ± 3	0.89 ± 0.16	107 ± 6
(7—9)e	35.16	—	-1.38 ± 0.28	1.72 ± 0.2	120 ± 2	0.51 ± 0.11	119 ± 4
(18—21)	38.63	16090 ± 7	-1.36 ± 0.06	2.13 ± 0.02	120 ± 4	0.25 ± 0.17	150 ± 20
(32—35)	38.63	16038 ± 1	-1.81 ± 0.10	1.78 ± 0.15	115 ± 3	0.52 ± 0.10	122 ± 1
(26—27)e	32.92	—	0.48 ± 0.12	2.30 ± 0.06	115 ± 2	0.17 ± 0.15	133 ± 10
(28—29)e	33.92	—	0.49 ± 0.09	2.33 ± 0.07	113 ± 6	0.50 ± 0.12	113 ± 24
(22—25)	35.63	16134 ± 10	-1.31 ± 0.08	2.07 ± 0.24	121 ± 9	0.38 ± 0.08	127 ± 16
(37—40)	38.63	16033 ± 8	-1.61 ± 0.09	2.13 ± 0.07	122 ± 2	0.30 ± 0.07	90 ± 15
(41—44)	38.40	16022 ± 2	-1.48 ± 0.09	1.95 ± 0.10	120 ± 1	0.47 ± 0.25	110 ± 16
(61—64)	38.40	15814 ± 2	-2.06 ± 0.04	1.92 ± 0.12	121 ± 2	0.43 ± 0.04	141 ± 2
(89—92)	38.44	15815 ± 9	-0.65 ± 0.16	2.44 ± 0.10	117 ± 3	0.46 ± 0.18	141 ± 16
(97—100)	38.44	15806 ± 2	-0.69 ± 0.04	1.04 ± 0.15	115 ± 17	0.86 ± 0.20	123 ± 16

Рис. 4. Зависимость амплитуды комы A_{31} и сферической aberrации A_{40} от положения фокуса

Серия гартманнограмм была снята при различных положениях вторичного зеркала (табл. 3). По параметрам aberrаций Зайделя была определена плоскость наилучших изображений, в которой минимизируется сферическая aberrация, а кома достигает среднего значения (рис. 4). Астигматизм в центре поля незначителен. Видно, что наилучшие изображения получаются при значении фокусного отсчета $f = 33$ мм, что согласуется с данными [5].

Исследование изображений по полю системы без корректора астигматизма (табл. 4) показало, что в волновом фронте доминирует полевой астигматизм с линейно растущей амплитудой и фазой, изменяющейся на $\Delta\Phi = 97 \pm 7^\circ$ в зависимости от положения в поле зрения. По полю наблюдается кома, постоянная по амплитуде и фазе, а также сферическая aberrация.

Картины полевого астигматизма, комы и сферической aberrации по полю в системе без корректора астигматизма (рис. 5, а—в) хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований [5] и подтверждают, что оптическая система фокуса Кассегрена 2-м телескопа на пике Терскол является классической системой Ричи—Кретьена.

Таблица 4. Вариации aberrаций Зайделя по полю в системе без корректора астигматизма ($f = 38.40\text{—}38.44$ мм)

Номера снимков	r	φ , град	$f_{\text{эф}}$, мм	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град
(41—44)	0.0'	0	16023 ± 2	-1.48 ± 0.09	1.95 ± 0.10	120 ± 5	0.48 ± 0.23	110 ± 16
(85—88)	12.5	0	15833 ± 9	-0.49 ± 0.10	2.24 ± 0.17	120 ± 1	3.90 ± 0.15	-4 ± 1
(49—52)	12.5	90	15817 ± 3	-1.72 ± 0.08	2.89 ± 0.7	139 ± 2	4.63 ± 0.04	97 ± 1
(53—56)	12.5	180	15825 ± 5	-1.24 ± 0.02	2.64 ± 0.01	115 ± 1	5.07 ± 0.04	0 ± 1
(57—60)	12.5	270	15832 ± 5	-2.15 ± 0.13	1.87 ± 0.09	93 ± 3	4.31 ± 0.05	95 ± 3
(81—84)	25.0	0	15817 ± 21	-1.99 ± 0.04	2.97 ± 0.27	104 ± 5	8.55 ± 0.05	-2 ± 1
(73—76)	25.0	90	15785 ± 7	-3.55 ± 0.17	1.72 ± 0.18	94 ± 6	10.92 ± 0.23	94 ± 1
(77—80)	25.0	180	15876 ± 3	-2.70 ± 0.30	2.01 ± 0.05	128 ± 7	9.52 ± 0.12	0 ± 1
(69—72)	25.0	270	15837 ± 15	-3.48 ± 0.27	2.31 ± 0.13	130 ± 5	10.43 ± 0.08	93 ± 4

Таблица 5. Вариации aberrаций Зайделя в поле зрения системы с корректором ($f = 38.19$ мм)

Номера снимков	r	φ , град	$f_{\text{эф}}$, мм	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град	$d_{0.8}$
(101—104)	0'	90	15665 ± 7	-2.89 ± 0.14	2.68 ± 0.12	103 ± 2	0.59 ± 0.12	86 ± 4	1.52" ± 0.05 "
(129—132)	12.5	0	15726 ± 28	-1.55 ± 0.21	0.42 ± 0.01	190 ± 18	1.21 ± 0.16	110 ± 7	1.11 ± 0.02
(125—128)	12.5	90	15703 ± 15	-1.23 ± 0.33	3.26 ± 0.18	150 ± 4	1.76 ± 0.20	90 ± 4	1.55 ± 0.06
(121/123)	12.5	180	15734	-0.96	2.05	81	1.63	95	1.36
(113—116)	25.0	0	15871 ± 12	-1.92 ± 0.07	3.95 ± 0.02	102 ± 2	2.18 ± 0.13	177 ± 3	1.82 ± 0.07
(105—108)	25.0	90	15823 ± 15	-2.44 ± 0.24	2.63 ± 0.08	70 ± 3	3.03 ± 0.07	84 ± 1	1.75 ± 0.09
(109—112)	25.0	180	15785 ± 15	-1.90 ± 0.13	2.56 ± 0.04	121 ± 2	2.19 ± 0.05	15 ± 5	1.42 ± 0.01
(117—120)	25.0	270	15844 ± 2	-2.77 ± 0.09	3.41 ± 0.07	159 ± 1	3.29 ± 0.19	96 ± 1	1.84 ± 0.04
(133/134)	0	90	15718	-2.02	0.89	117	2.05	98	1.42

Получены значения эффективного фокусного расстояния, а также расстояния от фокуса до предфокального снимка в зависимости от положения вторичного зеркала.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы для системы без корректора астигматизма:

— система 2-м телескопа на пике Терскол — классическая система Ричи—Кретьена с некомпенсированным астигматизмом; остаточная кома является результатом недостаточной юстировки системы;

— 80 % энергии концентрируется в кружке рассеяния $d_{0.8} = 1.04 \pm 0.04$ ". После юстировки и исключения всех aberrаций Зайделя можно достичь $d_{0.8} = 0.60 \pm 0.04$ ", что соответствует аттестационным требованиям;

— плоскость наилучших изображений соответствует значениям фокусировочного устройства $f = 33\text{...}33.5$ мм.

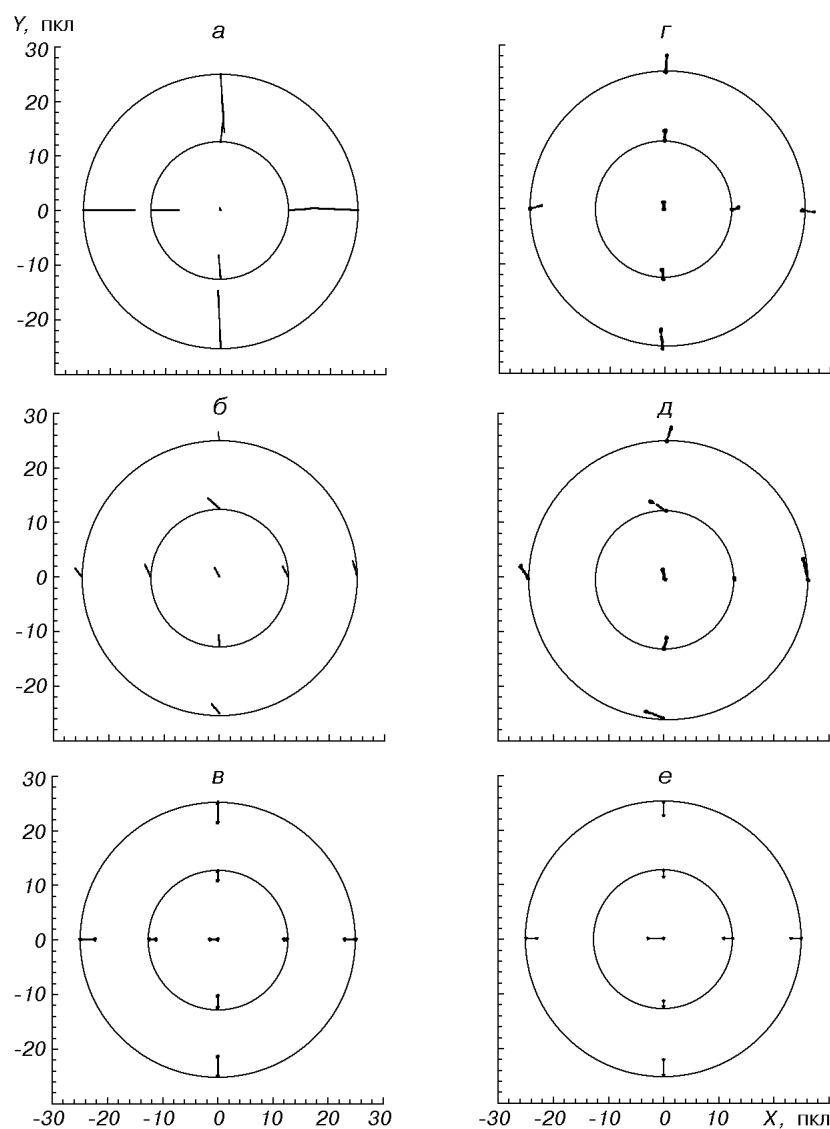


Рис. 5, а, б, в — полевой астигматизм, кома по полю и сферическая aberrация в системе без корректора в центре и на расстоянии 12.5' и 25' от центра; г, д, е — то же в системе с корректором

СИСТЕМА С КОРРЕКТОРОМ АСТИГМАТИЗМА

Для исправления полевого астигматизма 2-м телескопа на пике Терскол используется коррекционная пластина, которая устанавливается вблизи главного зеркала.

Исследование aberrаций Зайделя по полю в системе с корректором астигматизма (табл. 5) показало, что полевой астигматизм значительно уменьшился (рис. 5, г), средняя амплитуда его равна $A_{22} = 1.99 \pm 0.78$ мкм. То есть, корректор астигматизма выполняет свое функциональное назначение. По полю доминирует кома с амплитудой $A_{31} = 2.42 \pm 1.08$ мкм (рис. 5, д), являющаяся, по-видимому, результатом децентровки системы, и наблюдается незначительная сферическая aberrация (рис. 5, е).

Таблица 6. Характеристики изображения в центре поля системы с корректором астигматизма ($f = 38.19$ мм)

Номера снимков	$f_{\text{эф}}$, мм	$d_{0.8}$	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град	$d_{0.8}$ без aberrаций
101e103i	15659	1.51"	-2.97	2.64	105	0.49	88	0.75"
102e104i	15662	1.46	-2.69	2.62	103	0.52	90	0.75
102e103i	15675	1.59	-3.01	2.77	101	0.76	81	0.77
Среднее	15666	1.52	-2.89	2.68	103	0.59	86	0.76
	± 7	± 0.05	± 0.14	± 0.07	± 2	± 0.12	± 4	± 0.01

В табл. 6 приведены характеристики изображения в центре поля системы с корректором астигматизма. Видно, что диаметр кружка рассеяния с концентрацией энергии 80 % составляет $d_{0.8} = 1.52 \pm 0.05''$, после исключения комы $d_{0.8} = 1.21 \pm 0.06''$, а после исключения всех трех aberrаций Зайделя $d_{0.8} = 0.76 \pm 0.01''$, что близко к цеховому значению. На расстоянии 12.5' от центра $d_{0.8} = 1.34 \pm 1.08''$, а на расстоянии 25' — $1.7 \pm 0.16''$. Исключение aberrаций Зайделя из изображения позволяет достичь значительный $d_{0.8} = 0.82 \pm 0.10''$ для расстояний 25' от центра. Это несколько превышает аналогичные значения кружка рассеяния для системы без корректора астигматизма, что указывает о влиянии корректора астигматизма на концентрацию энергии в изображении.

Корректор астигматизма обладает ненулевой оптической силой, он уменьшает эффективное фокусное расстояние системы на $\Delta f_{\text{эф}} = 350$ мм в центре поля, на 100 мм на расстоянии 12.5' от центра поля и увеличивает его на 50 мм на расстоянии 25' от центра поля (табл. 4, 5), т. е. вносит небольшую переменность в масштаб изображения по полю.

НОСТИРОВКА СИСТЕМЫ

Одной из причин, вызывающих деградацию изображения, создаваемого оптической системой телескопа, является качество юстировки системы: точность совмещения оптических осей и расположения оптических элементов на расчетных расстояниях. При разъюстировках системы возникают прежде всего aberrации 3-го порядка. Гнутые трубы телескопа и несовершенство системы крепления приводят к децентровке зеркал, что также ухудшает качество изображения. Аттестация качества изображения дает возможность оценить состояние юстировки и эффекты гнутя [10].

На рис. 5 приведены картины астигматизма, комы и сферической aberrации системы с корректором астигматизма и без него. Симметричность астигматизма указывает на удовлетворительную в целом центровку системы. Наличие постоянной по величине и направлению комы указывает на то, что это не полевая кома, а результат остаточной децентровки. Количественное определение необходимых подвижек для компенсации комы проведено с помощью аналитической теории двухзеркальных систем [4, 9].

Сдвиги вторичного зеркала ΔX , ΔY связаны с параметрами комы F_x и F_y , которые находятся методом Гартманна, следующими зависимостями:

$$\Delta X = 4F_x/m^3,$$

$$\Delta Y = 4F_y/m^3.$$

Здесь $m = f_{\text{эф}}/f_1$ — увеличение системы, $f_{\text{эф}}$ и f_1 — фокусное расстояние системы и главного зеркала соответственно. Для 2-м телескопа на пике

Терскол $f_{\text{эф}} = 16000$ мм, $f_1 = 5589$ мм.

Для системы без корректора астигматизма $F_x = 7.34 \pm 0.83$ мм, $F_y = -3.94 \pm 0.37$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ мм, $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ мм. В системе с корректором параметры комы принимают значения $F_x = 8.13 \pm 2.50$ мм, $F_y = -4.25 \pm 1.50$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.38 \pm 0.42$ мм, $\Delta Y = -0.73 \pm 0.56$ мм.

Кроме того, было проведено моделирование поведения системы при различных разъюстировках зеркал. Моделирование проводилось при помощи пакета «Optcom», позволяющего анализировать качество создаваемого изображения при произвольных децентровках и наклонах зеркал. Прежде всего было выяснено, что в соответствии с теорией [6, 9] небольшие смещения зеркал с оси равноценны (с точки зрения качества системы) их разворотам вокруг так называемой «нейтральной точки», поэтому в дальнейшем операции проводились только с децентровками как технологически более осуществимыми.

Поставленная задача восстановления децентровок по измеренным aberrациям, строго говоря, является обратной и не имеет строгого детерминированного решения. Однако облегчающим фактором является явное превалирование комы над прочими aberrациями. Пренебрежение прочими aberrациями сводит задачу просто к решению системы линейных уравнений с использованием МНК.

В принятой системе координат децентровка вторичного зеркала составляет $\Delta X = 4 \pm 1$ мм; $\Delta Y = -1 \pm 1$ мм.

Мы отдаем предпочтение результатам $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ мм и $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ мм, поскольку количественный метод Гартманна является более определенным.

Более подробный анализ, однако, показывает, что помимо комы, объясняемой децентровкой, в системе есть астигматизм, величина и знаки которого не могут быть объяснены децентровкой. Не может он также быть объяснен и какой-либо комбинацией децентровок и разворотов зеркал. Возможно, источником избыточного астигматизма является недостаточно точно настроенная система разгрузки или термический воздушный клин в

Таблица 7. Вариации aberrаций Зайделя в центре поля в системе без корректора астигматизма в зависимости от зенитного расстояния z

Номера снимков	z , град	f , мм	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град	$d_{0.8}$ без aberrаций
68	5	38.44	-1.93	2.29	131	0.42	154	1.22"
(65—67)	6	38.40	-1.65	1.81	126	0.59	159	1.06 ± 0.07
(18—20)	8	38.63	-1.36	2.13	120	0.25	150	1.08 ± 0.01
(32—35)	12.5	38.63	-1.81	1.78	115	0.52	122	0.98 ± 0.04
(41—44)	24.5	38.40	-1.48	1.95	120	0.48	110	1.09 ± 0.08
(61—64)	24.5	38.40	-2.06	1.92	121	0.43	141	1.09 ± 0.04
(1—6)	28	38.16	-1.26	1.71	122	0.89	148	1.07 ± 0.02
(89—92)	30.5	38.44	-0.65	2.44	117	0.46	141	1.27 ± 0.02
(97—100)	58.5	38.44	-0.69	1.04	115	0.86	123	1.43 ± 0.11

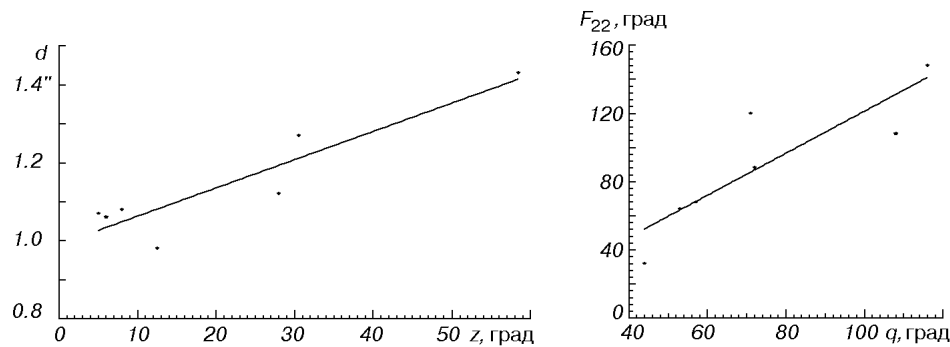


Рис. 6. Зависимости: *a* — качества изображения от зенитного расстояния, *b* — угла астигматизма Φ_{22} от параллактического угла q

трубе. Однако, как указывалось, этот астигматизм невелик и поэтому имеет смысл провести центровку системы до устранения комы. После этого можно проводить дополнительные исследования по поиску источников астигматизма, не маскируемого более другими aberrациями.

Для объяснения причин возникновения астигматизма проводилось исследование эффектов гнуптия трубы телескопа. Анализ изображений, полученных при различных зенитных расстояниях z и параллактических углах q , позволил выявить эти эффекты (табл. 7). Так как исследования проводились по звездам вблизи меридиана, то быстрые изменения здесь испытывает только параллактический угол q , т. е. угол между направлениями на полюс и зенит:

$$\operatorname{tg} q = \frac{\cos \varphi \sin t}{\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos t}$$

где φ — широта места наблюдения, δ , t — склонение и часовой угол наблюдаемой звезды.

На рис. 6, *a* видно, что с увеличением зенитного расстояния z , т. е. изменением положения трубы по отношению к силе тяжести, качество изображения ухудшается. Также четко выявляется функциональная зависимость между фазовым углом астигматизма и параллактическим углом (рис. 6, *b*). Таким образом, астигматизм в волновом фронте связан с проявлением силы тяжести, а не определяется качеством изготовления элементов оптической системы. Основной причиной его являются механические деформации поверхности зеркала под действием силы тяжести. Это подтверждают наблюдения вблизи зенита: фазовый угол в этом случае достигает наибольших значений.

АСТРОКЛИМАТ ТРУБЫ И ПОДКУПОЛЬНОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Труба 2-м телескопа на пике Терскол выполнена в виде закрытой конструкции (сплошная труба). Исследование [6] показало, что в этом случае изображение спокойнее, так как закрытая труба изолирует ход лучей от струй воздуха в подкупольном пространстве. Наличие турбулентных потоков внутри башни существенно портит дифракционное изображение звезды.

Для исследования микроклимата трубы и подкупольного пространства была проведена серия специальных наблюдений с диафрагмой Гартманна. Наблюдения проводились до, во время и после продува трубы и подкупольного пространства с различными экспозициями. Результаты этой серии

Таблица 8. Результаты исследования астроклимата трубы и башни телескопа

Номера снимков	$d_{0.8}$	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град	$d_{0.8}$	Примечание
1—6	1.06" ± 0.02 "	-1.26 ± 0.12	1.71 ± 0.11	122 ± 3	0.89 ± 0.16	107 ± 6	0.64 \pm 0.02"	После продува трубы и подкупольного пространства
10e—11e	1.71	-1.87	1.10	116	1.50	148	1.58 \pm 0.02	Во время продува подкупольного пространства $t_{\text{э}} = 0.2$ с
12e—13e	± 0.04 1.13	± 0.06 -1.93	± 0.27 2.00	± 30 128	± 0.25 0.63	± 1 148	0.68 \pm 0.01	—" $t_{\text{э}} = 20$ —25 с
14e—15e	± 0.02 1.85	± 0.10 -2.53	± 0.06 1.56	± 1 118	± 0.08 1.01	± 9 142	1.56 \pm 0.10	После продува трубы телескопа $t_{\text{э}} = 0.2$ с
16e—17e	± 0.04 1.31	± 0.11 -1.95	± 0.23 2.10	± 3 118	± 0.13 1.09	± 13 121	0.76 \pm 0.06	—" $t_{\text{э}} = 20$ с
(93—96)	± 0.10 1.52 ± 0.05	± 0.20 0.90 ± 0.14	± 0.32 1.78 ± 0.08	± 1 97 ± 1	± 0.09 0.93 ± 0.12	± 4 19 ± 4	0.92 \pm 0.03	Во время продува трубы

представлены в табл. 8.

Видно, что при короткой экспозиции диаметр кружка рассеяния велик, так как наличие воздушных неоднородностей размывает дифракционное изображение звезды. При экспозициях 20—25 с влияние атмосферных дрожаний усредняется, и изображение становится более четким. Кадры, полученные во время продува трубы телескопа и подкупольного пространства, показывают невысокое качество изображения, потому что возникающие во время продува ламинарные и турбулентные потоки влияют на его формирование. Качество изображения после продува становится лучше, что говорит о стабилизации состояния воздуха в трубе и в подкупольном помещении.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что для получения высокого качества изображения необходимо до наблюдений проводить систематический продув трубы телескопа и подкупольного пространства в течение времени, за которое разница между температурой подкупольного пространства и внешней среды сводится к минимуму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ гартманнограмм, полученных после промывки зеркал, продува трубы телескопа и подкупольного помещения, в целом подтвердил результаты предыдущих исследований по исследованию оптики 2-м телескопа в фокусе Кассегрена [5]. Вместе с тем в настоящей работе использовался более обширный наблюдательный материал, включающий снимки с короткой экспозицией при разных положениях ротатора и трубы телескопа на разных зенитных расстояниях. Все это позволило уточнить и получить улучшение аттестационных характеристик оптической системы. Например, диаметр кружка рассеяния после исключений всех aberrаций Зайделя достигнет $d_{0.8} = 0.6$ ", а не 0.7", как это было ранее [5].

Таким образом, для улучшения качества изображения и увеличения проникающей силы телескопа нужно систематически продувать трубу телескопа и подкупольное помещение.

Кроме того, получены новые сведения о поведении aberrаций Зайделя. В частности, четко выделяется функциональная зависимость между фазовым углом астигматизма и зенитным расстоянием. Астигматизм в волновом фронте связан с проявлением силы тяжести и не связан с качеством изготовления элементов оптической системы. Получен вывод о том, что с увеличением зенитного расстояния ухудшается качество изображения.

Наконец, анализ гартманнограмм позволил дать окончательные рекомендации по юстировке оптики 2-м телескопа в фокусе Кассегрена. Они по существу сводятся к устранению постоянной комы. В системе без корректора астигматизма параметры комы составляют $F_x = 7.34 \pm 0.83$ мм и $F_y = -3.94 \pm 0.37$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ мм и $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ мм. При этом остаются незначительные aberrации, которые объясняются эффектом гнутия трубы 2-м телескопа. В системе с корректором астигматизма параметры комы принимают значения $F_x = 8.13 \pm 2.50$ мм и $F_y = -4.25 \pm 1.50$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.38 \pm 0.42$ мм и $\Delta Y = -0.73 \pm 0.56$ мм.

1. Андрук В. М., Парусимов В. Г., Дудник Т. Б. Досвід цифрової обробки зображень зоряних полів в програмному пакеті MIDAS/ROMAFOT // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—1999.—№ 1.—С. 100—103.
2. Андрук В. М., Парусимов В. Г., Дудник Т. Б., Островський Д. Ю. Каталог положень та величин в системі R Джонсона 700 зірок в Гіадах. Вимірювання, астрометрична та фотометрична обробка фотоплатівок // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 6.—С. 489—500.
3. *Астрономічний календар 1999*. — Київ, 1998.—240 с.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973.
5. Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И. Исследование оптики 2-м телескопа в фокусе Кассегрена на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 6.—С. 543—556.
6. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. — М.: Наука, 1976.
7. Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.
8. Парусимов В. Г., Полянский А. В. Апаратные средства цифровой обработки астрономических изображений // Вестник Харьков. ун-та.—1981.—№ 223.—С. 67—77.
9. Русинов М. М. Техническая оптика. — М.: Машиностроение, 1979.
10. Салуквадзе Г. Н., Снежко Л. И. Исследование оптики АЗТ-11 // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1980.—53.—С. 191—228.
11. Снежко Л. И. Применение метода Гартманна и исследование главного зеркала БТА // Астрон. журн.—1980.—57, вып. 4.—С. 869—877.
12. Снежко Л. И. Применение диафрагмы Гартманна в задачах исследования формирования звездных изображений // Астрон. циркуляр.—1978.—№ 1002.—С. 6—7.
13. Wels D. C., Greisen E. W., Harten R. H. FITS: A flexible image transport system // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1981.—44.—P. 363—370.

Поступила в редакцию 10.10.00