

УДК 520.2+520.8+535.4

Г. З. Бутенко¹, В. И. Кузнецов¹, Л. И. Снежко²,
А. В. Сергеев¹, М. В. Андреев¹, В. Н. Андрук³,
В. Г. Парусимов³, В. Л. Костюченко³

¹Международный центр астрономических и медико-экологических исследований
Национальной академии наук Украины
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного, 27

²Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
35747 Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский район, п. Нижний Архыз

³Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного, 27

Результаты аттестации оптической системы кудэ 2-м телескопа на пике Терскол

Приведены результаты аттестации методом Гартмана оптической системы кудэ 2-м телескопа на пике Терскол. В волновом фронте наблюдаются все aberrации Зайделя (сферическая aberrация, кома, астигматизм). После юстировки диаметр кружка рассеяния с концентрацией энергии 80 %, может достичь значения равного $d_{0,8} = 1''$. Наличие в остаточных aberrациях треугольного астигматизма, выделенного на карте волнового фронта, объясняется эффектами гнущия трубы и системы разгрузки телескопа. Анализ каустических кривых показал, что в деградации изображения главную роль играют мелкомасштабные ошибки волнового фронта.

РЕЗУЛЬТАТИ АТЕСТАЦІЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ КУДЕ 2-М ТЕЛЕСКОПА НА ПІКУ ТЕРСКОЛ, Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И., Сергеев А. В., Андреев М. В., Андрук В. Н., Парусимов В. Г., Костюченко В. Л. — Наведено результати аттестациі методом Гартмана оптичної системи куде 2-м телескопа на піку Терскол. У хвильовому фронті присутні всі aberrації Зайделя (сферична aberrація, кома, астигматизм). Після юстування діаметр кружка розсіяння (концентрація енергії 80 %) може досягти значень $d_{0,8} = 1''$. Наявність у залишкових aberrаціях трикутного астигматизму, який виділяється на карті хвильового фронту, можемо пояснити ефектами гнущия труби і системи розвантаження телескопа. Аналіз каустичних кривих показав, що в деградації зображення головну роль грають дрібномасштабні помилки хвильового фронту.

SOME RESULTS OF THE ATTESTATION OF THE COUDE OPTICAL SYSTEM OF THE 2-M TERSKOL OBSERVATORY TELESCOPE, by Butenko G. Z., Kuznetsov V. I., Snezhko L. I., Sergeev A. V., Andreev M. V., Andruk V. N., Parusimov V. G., Kostiuchenko V. L. — We present some results of the attestation of the coude optical system of the 2-m Terskol Observatory telescope by Hartmann's method. All of the Zaidel aberrations (the spherical aberration, coma, and astigmatism) exist in the wavefront. On eliminating the aberrations by performing the adjustment for the telescope, the value $d_{0.8} = 1''$ (energy concentration is 80 %) can be achieved for star images. The presence of the triangular astigmatism in the residual aberrations which is prominent on the wavefront map can be explained as a result of the flexure of the tube and telescope unloading system. Our analysis of caustic curves shows that small-scale errors of the wavefront play the main role in the image degradation.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование фокуса кудэ 2-м телескопа методом Гартмана проводилось Международным центром астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины и Специальной астрофизической обсерваторией Российской академии наук при активном участии Главной астрономической обсерватории НАН Украины в рамках программы исследования оптики 2-м телескопа на пике Терскол на протяжении 2001—2004 гг. [1, 3, 4]. Целью работы была аттестация оптической системы кудэ 2-м телескопа на пике Терскол.

В библиографии приводятся результаты исследований оптики фокуса кудэ 1.5-м телескопа АЗТ-12 Тартусской астрофизической обсерватории (Эстония) [7], 2.2-м телескопа Института астрономии им. Макса Планка (Гейдельберг, ФРГ) [19] и 1.5-м Российско-Турецкого телескопа РТТ150 [http://hea.iki.rssi.ru/AZT22/RUS/to_opt.htm]. Как правило, качество оптической системы кудэ телескопов характеризуется только кружком рассеяния света, а в работе [19] представлены исследования вторичного зеркала фокуса кудэ.

В настоящее время в фокусе кудэ 2-м телескопа установлен современный кудэ-эшелле спектрометр с ПЗС-приемником изображения [9], с помощью которого проводятся спектральные исследования многих астрономических объектов. Так как оптическая ось приборов, установленных в фокусе кудэ, неподвижна, гнутие телескопа вызывает нарушение соосности оптики спектрометра и телескопа. Это может привести к неполному освещению щели коллиматора и снизить проникающую способность телескопа [17]. Наличие aberrаций, особенно астигматизма, при небольшом отступлении от фокуса сильно искажают изображение звезды. В этом случае трудно сохранить симметричное положение звезды на щели во время экспозиции, что ведет к ошибкам спектроскопических наблюдений [6]. Поэтому задача аттестации оптической системы кудэ является очень актуальной.

НАБЛЮДЕНИЯ В ФОКУСЕ КУДЭ И ИХ ОБРАБОТКА

Система кудэ является комбинацией главного зеркала, вторичного гиперболического зеркала кудэ и двух плоских зеркал, направляющих свет горизонтально в неподвижный фокус.

Ее основные технические характеристики:

— эквивалентное фокусное расстояние	72017 мм
— светосила	1:36

— поле, свободное от виньетирования	5'
— линейное поле зрения	105 мм
— масштаб	2.9 "/мм

Для аттестации оптической системы кудэ был применен метод Гартмана.

Наблюдения с диафрагмой Гартмана проводились 5/6.07.2001 г., 19—21.01.2003 г. и 4/5.07.2004 г. Первый сет наблюдений дал возможность отработать методику наблюдений и их обработку, адаптировать программный комплекс к параметрам оптической системы.

Установка для получения внефокальных снимков и методика ее юстировки были разработаны и проверены в САО РАН. Особенностью эксперимента в фокусе кудэ является отсутствие отъюстированных посадочных мест и «теснота» в шелевой части штатного спектрографа, что дает возможность получать только зафокальные изображения диафрагмы Гартмана. Точность методики обработки одного кадра значительно ниже, чем в случае совместной обработки пред- и зафокального снимков. Поэтому на наклон пленки к плоскости изображений накладываются очень жесткие условия ($\omega_0 < 1.5^\circ$) [14]. Была разработана процедура юстировки, предполагающая, что выполнено совмещение оптических осей телескопа и спектрографа. Плоскость внефокального снимка с помощью лазерного луча устанавливалась перпендикулярно к оси шель-центр коллиматора. Методика была отработана на телескопе Цейс-1000 САО РАН. В качестве приемника света звезд использовалась черно-белая фотопленка «Свема-64». Наблюдения звезд в центре поля телескопа проводились при разных положениях фокуса, зенитных расстояниях z и азимутах. Исследовалась система без корректора астигматизма. Всего было получено 145 гартманограмм, 48 из которых пригодны для обработки и анализа. Краткая информация о наблюдениях с диафрагмой Гартмана в фокусе кудэ приведена в табл. 1.

Таблица 1. Сведения о наблюдениях в фокусе кудэ

Период наблюдений	Объект	Количество снимков	Экспозиция, с	F, м	z , град
5/6.07.2001 г.	γ Cyg, $\alpha = 20^{\text{h}}22^{\text{m}}15^{\text{s}}$, $\delta = +40^\circ15'30''$; $V = 2.23^{\text{m}}$; $Sp = A0$	19	30—140	39.5	10—17
19—21.01.2003 г.	γ Gem, $\alpha = 6^{\text{h}}37^{\text{m}}36^{\text{s}}$, $\delta = +16^\circ24'04''$; $V = 1.9^{\text{m}}$; $Sp = A0$	54	45, 50, 55	39.16—40.16	29—36
4/5.07.2004 г.	α Lyr, $\alpha = 18^{\text{h}}36^{\text{m}}57^{\text{s}}$, $\delta = +38^\circ47'03''$; $V = 0.03^{\text{m}}$; $Sp = A0V$	72	10, 20, 40	38.5—42	14—22

Для исследования состояния оптической системы кудэ использовалась штатная диафрагма с 48 отверстиями, расположенными в узлах прямоугольной сетки; радиус отверстий — 60 мм, расстояние между ними — 245 мм. Из-за равномерности расположения отверстий прямоугольная сетка позволяет исследовать волновой фронт с максимальной полнотой [5, 12]. По условиям М. Романовой [13] оптимальные параметры диафрагмы для фокуса кудэ ($F_{\text{эф}} = 72000$ мм), при которых изображения соседних дыр

перекрываются не более чем четвертым дифракционным максимумом, составляют:

- радиус отверстий $A > 72$ мм,
- расстояние между центрами отверстий $L > 360$ мм.

При этих параметрах оптимальное расстояние фотопленки от фокуса должно составлять $T = \pm 230$ мм. Таким образом, штатная диафрагма, близка к оптимальной, но требует компенсации малого расстояния между центрами отверстий путем увеличением T . Поэтому хорошо разрешимые снимки были получены на расстояниях от фокуса $T = 550 \dots 900$ мм.

Гартманогаммы измерялись на автоматическом комплексе АЦМФ-ХУ [10]. После выполнения предварительной обработки средствами комплекса кадры записывались в формате FITS. Негативы сканировались с пространственным разрешением 50×50 мкм. Как показал опыт обработки наблюдений в фокусе Кассегрена, такого пространственного разрешения достаточно для получения неискаженных прямоугольных координат и инструментальных величин изображений отверстий, размеры которых в среднем составляли 40×40 пкл. Пример отсканированной гартманогаммы, а также частично обработанного кадра приведен на рис. 1.

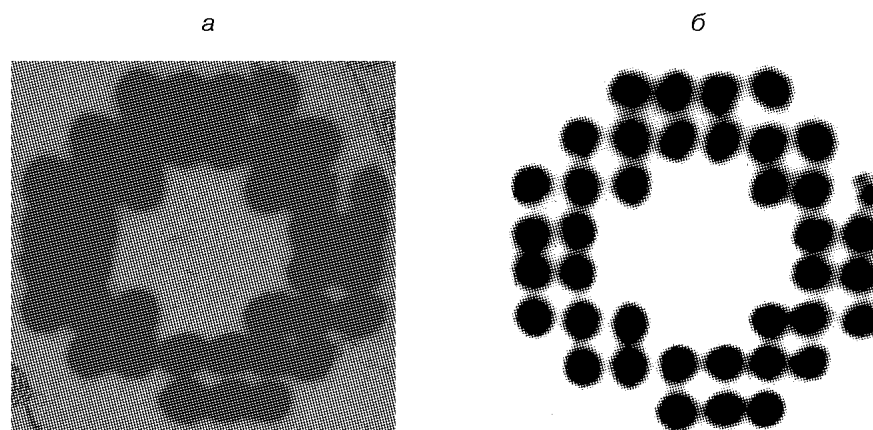


Рис. 1. Оцифрованная гартманогамма (а) и кадр (б) подготовленный к обработке ($f = 39.5$ м)

Фотометрический разрез оцифрованного снимка для одного из рядов изображения диафрагмы Гартмана после сканирования на АЦМФ-ХУ показан слева вверху на рис. 2. При больших экспозициях вершины объектов (изображений отверстий диафрагмы) плоские и имеют значительную площадь. При необходимости программными средствами MIDAS [18] для объектов с плоскими вершинами дополнительно сверху достраивались гауссоподобные объекты. Площадь основания и амплитуда этих объектов определялась амплитудой плотности почернения измеренных объектов. Суммарное изображение сглаживалось с помощью фильтров FILTER/MEDIAN и FILTER/SMOOTH из программного пакета MIDAS. Фотометрический разрез конечного изображения показан на рис. 2, б. Прямоугольные координаты и фотометрические величины объектов определялись в автоматическом режиме работы пакета ROMAFOT. Вид диафрагмы Гартмана после обработки в MIDAS/ROMAFOT показан на рис. 2, в.

Для определения aberrаций Зайделя была использована методика обработки одного кадра, ранее применявшаяся для исследования б-м теле-

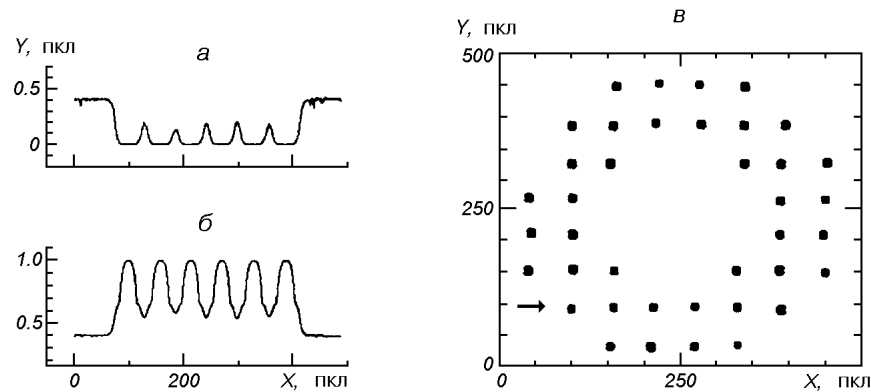


Рис. 2. Фотометрические разрезы: *a* — оцифрованного изображения, *б* — конечного изображения, *в* — вид диафрагмы Гартмана после обработки в MIDAS/ROMAFOT

скопа САО РАН и фокуса Кассегрена 2-м телескопа на пике Терскол [15, 1, 4]. Программа была адаптирована к характеристикам штатной диафрагмы фокуса кудэ. Предварительная подготовка прямоугольных координат и фотометрических величин изображений отверстий диафрагмы Гартмана к заданному формату записи проводилась с помощью программы, работающей в среде TURBO PASCAL .

РЕЗУЛЬТАТЫ АТТЕСТАЦИИ ФОКУСА КУДЭ

Система кудэ, как указывалось выше, является комбинацией главного и вторичного гиперболических и двух плоских зеркал. Исследование фокуса Кассегрена телескопа, в состав которого входит то же главное зеркало, показало, что данная система имеет небольшую сферическую aberrацию, кому децентровки либо наклона и небольшой скомпенсированный корректором астигматизм [1, 4].

Анализ изображений гартманограмм, полученных в разные сетки наблюдений, показал, что в волновом фронте фокуса кудэ есть все aberrации Зайделя третьего порядка (табл. 2). Данные получены при положении фокусирующего устройства вторичного зеркала $f = 39.5\text{--}40.0$ мм.

Данные табл. 2 позволяют сделать вывод, что доминирующей aberrацией является сферическая со средней амплитудой $A_{40} = 2.08 \pm 0.19$ мкм, которая объясняется тем, что плоскость наилучших изображений не совпадает с плоскостью наблюдений [16]. Это характерно для оптической системы кудэ, в которой плоскость наилучшей фокусировки находится внутри щели, куда невозможно поместить аппаратуру для исследований. Амплитуды комы и

Таблица 2. Aberrации Зайделя фокуса кудэ 2-м телескопа

N сетка	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град
1	2.24	1.08	-31	0.39	69
2	2.18	1.47	206.3	1.65	4.8
3	1.81	1.49	99.0	0.79	7.2

Примечание. A_{1k} и Φ_{1k} — соответственно амплитуды и позиционные углы aberrаций Зайделя в волновом фронте: A_{40} — сферическая aberrация, A_{31} — кома, A_{22} — астигматизм; Φ_{31} , Φ_{22} — соответствующие позиционные углы.

астигматизма составляют $A_{22} = 1.35 \pm 0.19$ мкм и $A_{31} = 0.94 \pm 0.52$ мкм, что близко к аналогичным значениям фокуса Кассегрена.

Была получена серия гартманограмм при различных положениях вторичного зеркала. Их обработка дала возможность определить оптимальное положение фокуса, при котором минимизируется влияние aberrаций на кружок рассеяния. Значение aberrаций и кружков рассеяния при разных положениях фокуса приведены в табл. 3.

На рис. 3 представлены зависимости амплитуд aberrаций Зайделя от положения вторичного зеркала (отсчета фокусирующего устройства). Плоскости наилучших изображений соответствует значение $f = 38.5...39.0$ мм, при котором влияние aberrаций на кружок рассеяния наименьшее. Амплитуда комы в этой области увеличивается, но уменьшение сферической aberrации и астигматизма компенсирует влияние этой aberrации на кружок рассеяния. При этом 80 % энергии содержится в кружке размера $d_{0.8} = 1.46'' \pm 0.2''$ (табл. 3).

Методом восстановления волнового фронта получено распределение энергии точечного источника, а также рассчитан кружок рассеяния при исключении aberrаций (табл. 4).

Анализ табл. 3, 4 показывает, что реальный кружок рассеяния составляет $d_{0.8} = 1.54'' \pm 0.06''$, что не удовлетворяет современным требованиям.

Таблица 3. Вариации aberrаций Зайделя в центре поля оптической системы кудэ для разных положений вторичного зеркала (по данным наблюдений 4/5.07.2004 г.)

f , мм	T , мм	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	Φ_{31} , град	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град	$d_{0.8}$	$d_{0.8}^{б.а.}$
38.5	932.3 ± 1.3	0.48 ± 0.03	1.41 ± 0.27	102 \pm 1	0.55 ± 0.24	21 \pm 6	1.49'' $\pm 0.03''$	1.42'' $\pm 0.08''$
39.0	861.6 ± 2.9	1.23 ± 0.40	1.75 ± 0.09	84 \pm 2	0.95 ± 0.31	8 \pm 2	1.44 ± 0.04	1.33 ± 0.03
39.5	783.5 ± 1.2	1.50 ± 0.19	1.66 ± 0.28	84 \pm 12	0.70 ± 0.50	10 \pm 3	1.64 ± 0.17	1.46 ± 0.08
40.0	705.7 ± 1.7	1.59 ± 0.38	1.38 ± 0.06	111 \pm 12	1.09 ± 0.31	7 \pm 1	1.58 ± 0.14	1.38 ± 0.14
40.5	630.7 ± 1.9	2.07 ± 0.20	1.13 ± 0.07	91 \pm 1	1.29 ± 0.51	7 \pm 2	1.52 ± 0.14	1.23 ± 0.06
41.0	554.0 ± 0.48	2.09 ± 0.34	0.88 ± 0.09	104 \pm 13	1.05 ± 0.24	6 \pm 2	1.59 ± 0.03	1.34 ± 0.12

Примечание. T — расстояние снимка от фокуса, $d_{0.8}$ — диаметр кружка рассеяния, содержащего 80 % энергии, $d_{0.8}^{б.а.}$ — тот же кружок рассеяния после исключения aberrаций Зайделя.

Таблица 4. Кружки рассеяния с различной концентрацией энергии для нескольких снимков

Сет, номер снимка	$d_{0.4}$	d_{06}	$d_{0.8}$	$d_{0.8}$		
				при исключении комы	при исключении астигматизма	при исключении сферической aberrации
3_33e	0.83	1.08	1.37	1.24	1.31	1.05
3_30e	0.88	1.13	1.40	1.34	1.34	1.29
3_66e	0.88	1.20	1.56	1.48	1.70	1.22
2_10e	1.06	1.23	1.56	1.47	1.54	1.18

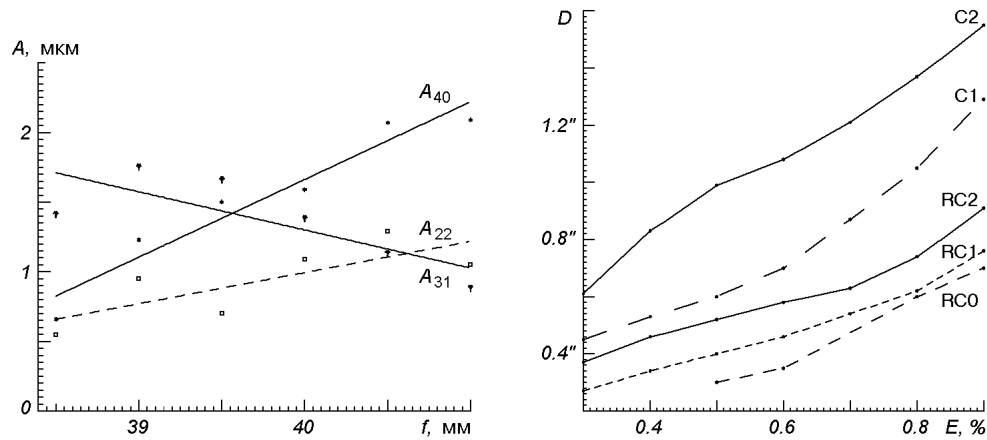


Рис. 3. Ход амплитуд aberrаций Зайделя с изменением фокусного расстояния

Рис. 4. Концентрация энергии в кружке рассеяния для фокусов Кассегрена (RC0 — техническое задание, RC1 — теоретическая кривая, рассчитанная по методу Гартмана, RC2 — реальная кривая) и кудэ: C1 — теоретическая кривая, полученная методом Гартмана, C2 — реальные данные

Этот факт накладывает ограничения на размер щели эшелле-спектрометра, размещенного в фокусе кудэ, которая должна быть не менее $1.5''$, в противном случае теряется часть световой энергии от наблюдаемой звезды. Исключение комы уменьшает кружок рассеяния, средние значения которого могут достичь величины $d_{0.8} = 1.44'' \pm 0.06''$. Исключение астигматизма не всегда улучшает ситуацию. Это указывает на то, что причиной астигматизма являются не только ошибки в изготовлении зеркала, но и другие факторы. После исключения всех aberrаций можно добиться для лучших наблюдений значений кружка рассеяния $d_{0.8} = 1.1'' \pm 0.02''$, что близко к параметрам системы Ричи — Кретьена [1, 4].

На рис. 4 представлено распределение световой энергии в кружке рассеяния, создаваемого оптической системой кудэ. Для сравнения приведены данные аналогичных параметров фокуса Кассегрена.

Сравним наши результаты с исследованиями фокуса кудэ других телескопов. Так, по данным аттестации фокуса кудэ 1.5-м Российско-Турецкого телескопа АЗТ-22 после проведения юстировочных работ 79 % световой энергии содержится в кружке $d = 0.52''$. Кружок рассеяния фокуса кудэ 1.5-м телескопа АЗТ-12 [6] составляет $d_{0.8} = 1.5''$. Из рис. 4 (кривая C1) видно, что после устранения aberrаций в системе кудэ 2-м телескопа на пике Терскол можно достичь качества изображения $d_{0.8} = 0.95''$.

Так как наблюдения проводились только в центре поля, невозможно достоверно указать причины возникновения комы. Исследования фокуса Кассегрена телескопа показало, что кома этой системы не является следствием ошибок изготовления зеркала (полевая кома), а результат децентровки системы. Можно предположить, что аналогичная ситуация и в фокусе кудэ.

Мы сравнили типичные геометрические кружки рассеяния фокуса кудэ и Кассегрена (рис. 5, а и в), а также привели зоны диафрагмы, спроектированные на поверхность главного зеркала, изображения которых лежат вне кружка $d_{0.8}$ (рис. 5, б). Видно, что картины рассеяния в фокусе кудэ и в

Таблица 5. Вариации aberrаций Зайделя при разных зенитных расстояниях ($f = 39.18...39.5$ мм)

Z, град	A_{40} , мкм	A_{31} , мкм	A_{22} , мкм	Φ_{22} , град	$d_{0.8}$
15.1	1.50 ± 0.19	1.66 ± 0.29	0.92 ± 0.50	17 ± 5	$1.58'' \pm 0.12''$
19.7	1.69 ± 0.42	1.76 ± 0.27	1.27 ± 0.08	9 ± 3	1.64 ± 0.18
29.0	0.16 ± 0.08	2.90 ± 0.51	2.40 ± 0.43	2.9 ± 0.4	1.83 ± 0.12
30.5	1.57 ± 0.07	2.40 ± 0.26	2.13 ± 0.08	2.9 ± 0.1	2.00 ± 0.10
33.0	2.66 ± 0.03	1.35 ± 0.04	3.24 ± 0.16	2 ± 0.3	2.23 ± 0.05
33.2	2.13 ± 0.02	1.59 ± 0.35	3.11 ± 0.13	2.5 ± 0.1	2.05 ± 0.05

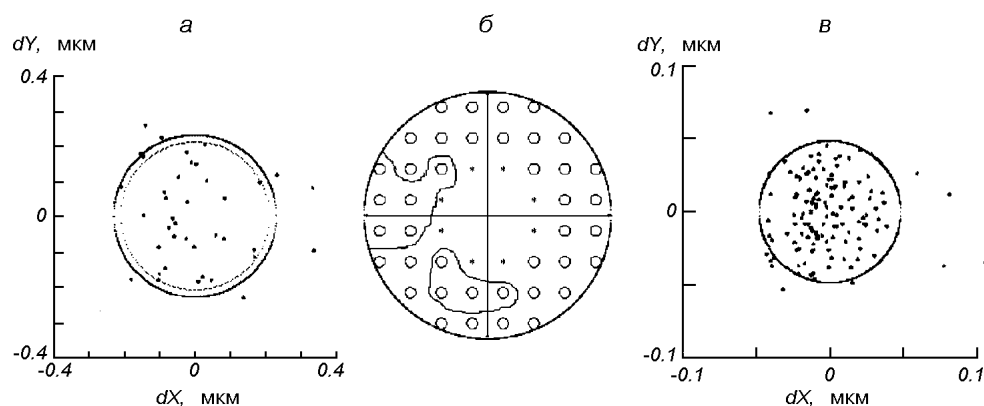


Рис. 5. Типичный кружок рассеяния системы кудэ (а). Внешний круг содержит 80 % световой энергии, внутренний — 60 %. Диафрагма Гартмана фокуса кудэ (б): звездочки — виньетированные отверстия; выделенные области — зоны диафрагмы, изображения которых лежат вне области с $d_{0.8} = 1.4''$. Кружок рассеяния оптической системы Кассегрена (в)

фокусе Кассегрена аналогичны. Конструктивно оба вторичные зеркала кудэ и Кассегрена в передней крестовине смонтированы одно по отношению к другому своими задними поверхностями, и поворотом несущей крестовины на 180° на выбор могут быть включены в ход лучей. Можно предположить, что кома в фокусе кудэ имеет ту же природу, что и в фокусе Кассегрена, и является следствием недоюстировки системы.

Для объяснения причины астигматизма были рассмотрены эффекты гнуптия трубы. С этой целью анализировались наблюдения, полученные на различных зенитных расстояниях Z (табл. 5) и при различных параллактических углах q . Так как наблюдения звезд проводились вблизи меридиана, то наибольшим изменениям здесь подвергался параллактический угол, т. е. угол между направлением на полюс и зенит. Он определяется из параллактического треугольника как

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

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

Изменение величины кружка рассеяния с зенитным расстоянием показано на рис. 6.

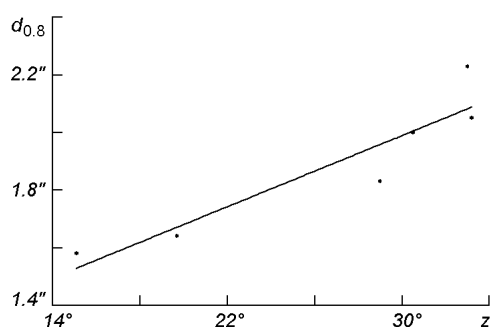


Рис. 6. Зависимость качества изображения от зенитного расстояния

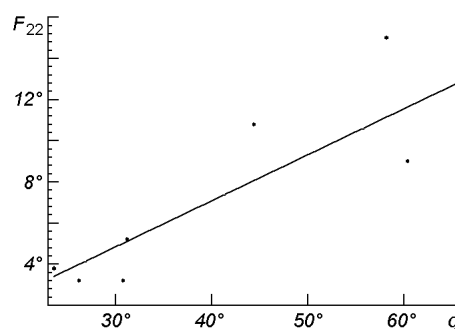


Рис. 7. Изменение фазы астигматизма с параллактическим углом

Амплитуда астигматизма увеличивается с увеличением Z , фазовый угол астигматизма изменяется в пределах от 28° до 2° , достигая наибольшего значения в зените.

Видно, что с увеличением зенитного расстояния, т. е., с увеличением нагрузок на трубу и зеркало, качество изображения ухудшается. Это подтверждается наличием четко выраженной функциональной зависимости между фазовым углом астигматизма и параллактическим углом (рис. 7).

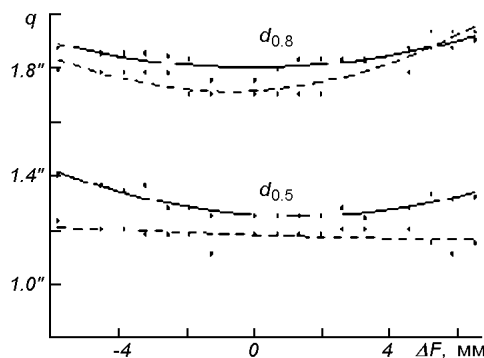
Таким образом, причиной возникновения астигматизма в волновом фронте фокуса кудэ 2-м телескопа являются как ошибки изготовления зеркала телескопа, так и механические деформации поверхности зеркала под влиянием силы тяжести и эффекты гнущия трубы.

Для выявления крупномасштабных ошибок оптической системы кудэ исследовалось влияние дефокусировки на качество изображения. Проводился расчет каустических кривых, сечений поверхности световой волны с определенной концентрацией энергии плоскостью, расстояние которой от фокуса изменяется.

На рис. 8 показана каустика изображений для $q(\Delta F)$, где ΔF — положения фокальной плоскости. Можно видеть, что минимумы каустики для всех q очень гладкие, смещение изображений вдоль оси в пределах ± 3 мм практически не изменяет концентрацию энергии в нем. Сдвиг изображения на ± 3 мм соответствует смещению вторичного зеркала на ± 18 мкм [11].

Не обнаруживается различие значений фокуса для максимальной интенсивности в центре изображения ($q = 0.5$) и минимального кружка

Рис. 8. Каустические кривые для кружков рассеяния с различной концентрацией энергии: сплошная линия — снимок 1_4e, штриховая — 1_8e



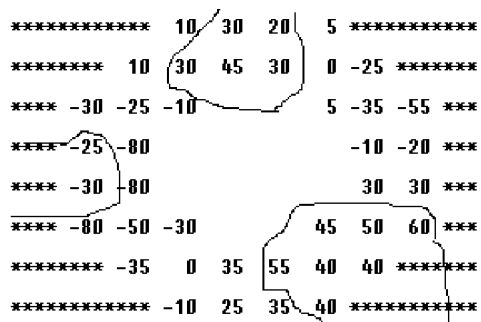


Рис. 9. Карта волнового фронта центра поля оптической системы кудэ (абберации Зайделя исключены, $h = 0.4$ мкм, масштаб высот — 0.01 мкм). Выделенные области иллюстрируют картину треугольного астигматизма.

а

б

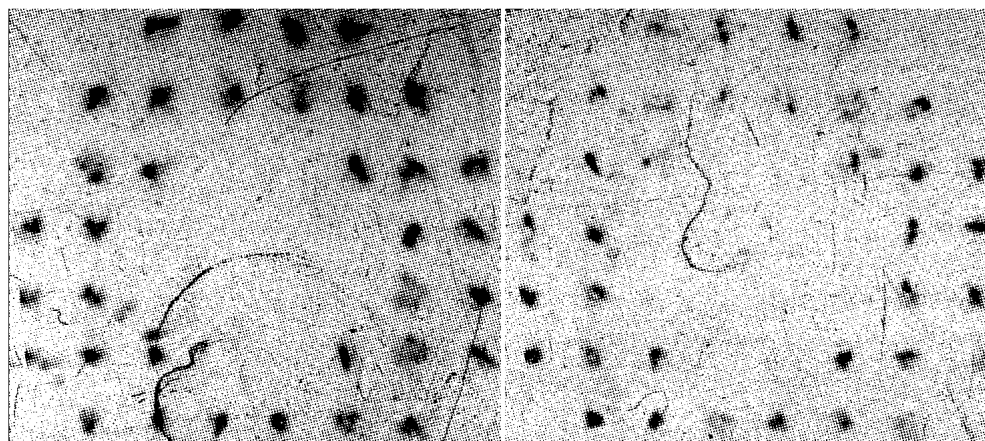


Рис. 10. Изображения диафрагмы Гартмана, искаженные влиянием атмосферы (экспозиция 1/30 с).

рассеяния ($q = 0.8$). Это показывает, что в деградации изображений главную роль играют мелкомасштабные ошибки волнового фронта.

Были построены исходные карты волнового фронта для центра поля системы кудэ. Среднее квадратичное отклонение h волнового фронта от сферического составляет 0.7...0.9 мкм. После исключения aberrаций Зайделя $h = 0.3...0.5$ мкм, т. е. отклонение от поверхности эффективного параболоида достигает $\lambda/2$.

На рис. 9 показана карта волнового фронта, иллюстрирующая картину остаточных aberrаций оптической системы кудэ. Линиями отмечены области, где наблюдается треугольный астигматизм. Такой характер астигматизма возможен для 3-точечной системы разгрузки Гребба [8], которая используется на 2-м телескопе пика Терскол. При этом кружок рассеяния достигает значений $1.0''$. Подобные карты волнового фронта были рассчитаны для оптической системы Кассегрена [2, 4].

Все приведенные выше результаты были получены без учета влияния атмосферы, т. е. они являются верхним пределом оцениваемых параметров.

Влияние атмосферной неустойчивости обнаруживалось в шуме эксперимента. Мы не задавались отдельной задачей изучения астроклимата тракта кудэ. В процессе эксперимента было получено несколько снимков с короткими экспозициями, которые приводим для иллюстрации влияния атмосферной турбулентности на вид изображения диафрагмы Гартмана (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы для оптической системы кудэ:

- в волновом фронте наблюдаются все aberrации Зайделя. Доминирует сферическая aberrация, что показывает несовпадение плоскости наилучшей фокусировки с плоскостью наблюдений. Наблюдаемая кома, возможно, является следствием недоюстировки оптической системы кудэ. Причиной астигматизма, как показано выше, являются ошибки изготовления зеркала телескопа, механические деформации поверхности зеркала под влиянием силы тяжести, гнутые трубы телескопа;
- плоскости наилучших изображений соответствует значение фокусировочного устройства $f = 38.5\text{—}39.0$ мм, при котором влияние aberrаций на кружок рассеяния наименьшее;
- реальный кружок рассеяния с концентрацией энергии 80 % составляет $d_{0.8} = 1.54'' \pm 0.06''$, что накладывает ограничения на размер щели эшелеспектрометра, размещенного в фокусе кудэ, которая должна быть не менее $1.5''$. После исключения всех aberrаций можно добиться для лучших наблюдений значений кружка рассеяния $d_{0.8} = 1.0'' \pm 0.02''$, что демонстрирует кривая распределения энергии в фокусе кудэ, рассчитанная методом Гартмана;
- в остаточных aberrациях системы кудэ проявляется треугольный астигматизм, который возможен в 3-точечной системе разгрузки Гребба;
- плавный ход каустических кривых указывает на то, что в деградации изображений главную роль играют мелкомасштабные ошибки волнового фронта, которые выше в системе кудэ, чем в системе Кассегрена за счет удлинения оптического пути света и наличия двух плоских зеркал для выноса фокуса;
- дополнительных исследований требует астроклимат тракта кудэ, который сильно проявляется при коротких экспозициях.

В целом проведенные исследование оптики фокуса кудэ 2-м телескопа показали удовлетворительные характеристики изображения и волнового фронта, которые можно улучшить дополнительной юстировкой телескопа.

1. 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.
2. Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И. Aberrации оптических систем 2-м телескопа на пике Терскол // «Околоземная астрономия—2003»: Сб. тр. конф. — С.-Пб., 2003.— Ч. 2.—С. 229—234.
3. Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И. и др. Исследования оптических систем 2-м телескопа на пике Терскол // Журн. физ. исслед.—2002.—6, № 4.—С. 371—375.
4. Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И. и др. Исследование астроклимата и оптики 2-м телескопа на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 1.—С. 71—88.
5. Витриченко Э. А. Методы исследования астрономической оптики. — М.: Наука, 1980.—152 с.
6. Курс астрофизики и звездной астрономии / Под ред. А. А. Михайлова. — М.: Наука, 1973.—Т. 1.—С. 362—366.
7. Лууд Л., Маазик М. Качество оптики 1.5-метрового телескопа АЗТ-12. 1. Исследование систем Кассегрена и кудэ методом Гартмана // Публ. Тартут. астрофиз. обсерватории.— 1978.—46.—С. 194—208.
8. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы: Теория и конструкции. — М.: Наука, 1976.— С. 385—389.
9. Мусаев Ф. А., Галатзутдинов Г. А., Сергеев А. В. и др. Кудэ-эшелеспектрометр для 2-м телескопа на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 3.— С. 282—287.
10. Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—

- Вып. 45.—С. 86—99.
11. *Попов Г. М.* Современная астрономическая оптика. — М.: Наука, 1988.—190 с.
 12. *Проблемы* оптического контроля / Под ред. И. В. Самохвалова. — Новосибирск: Наука, 1990.
 13. *Романова М.* Исследование параболических зеркал методом Гартмана // Тр. ГОИ.— 1927.—4, вып. 35.—88 с.
 14. *Снежко Л. И.* Оценка надежности результатов исследования астрономической оптики методом Гартмана // Астрон. журн.—1979.—56, вып. 5.—С. 1094—1099.
 15. *Снежко Л. И.* Применение метода Гартмана к исследованию главного зеркала БТА // Астрон. журн.—1980.—57, вып. 4.—С. 869—877.
 16. *Тудоровский А. И.* Теория оптических приборов. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.—Ч. 1.—С. 400—403.
 17. *Уокер Г.* Астрономические наблюдения. — М.: Наука, 1990.—С. 114—117.
 18. *European Southern Observatory — Image Processing Group* 1994, MIDAS Users Guide, Volume A, B and C, ESO, Garching.
 19. *Kuhne C.* Production and testing of optical elements of the first 2.2 m - Telescope for MPIA // Astron. and Astrophys.—1975.—41.—P. 345—353.

Поступила в редакцию 08.02.05