

ОПЫТ ЮСТИРОВКИ ОПТИКИ ПЕРВИЧНОГО ФОКУСА БТА

В. Я. Вайнберг, Н. А. Викульев, Л. И. Снежко

Описано применением метода Гартмана для контроля состояния юстировки оптики первичного фокуса БТА. Изложена методика юстировки линзового корректора поля. Приведены данные текущего состояния качества юстировки оптики первичного фокуса БТА.

The use of Hartman test in controlling the adjustment of the BTA prime focus optics is described. Methods of the adjustment of lens field corrector are presented. The current data on the adjustment quality of the BTA prime focus optics are given.

Вращение поля при сопровождении небесного объекта является основной особенностью альт-азимутальной монтировки. В первичном фокусе (ПФ) телескопа БТА компенсация вращения поля осуществляется с вращением с расчетной скоростью стола первичного фокуса [1]. Центр поля ПФ определяется пересечением оси этого компенсационного вращения с фокальной плоскостью, поэтому для идеальной монтировки с этим физически определенным центром должны быть совмещены центр наилучших изображений (оптический центр) и центр системы наведения. При рассогласовании положения этих трех центров возникают ошибки наведения, трудности гидирования и падает проникающая сила телескопа как при наблюдениях с целевыми приборами на оси, так и при получении прямых снимков.

Проведенные осенью 1983 г. исследования ПФ БТА показали, что за время эксплуатации телескопа в результате различных профилактических работ произошло снижение точностных характеристик ведения и качества изображения, создаваемого оптикой телескопа. Анализ количественных данных показал, что главной причиной снижения всех характеристик явился наклон оптической оси главного зеркала к оси трубы, а также децентрировка элементов корректора поля. Поэтому были запланированы и весной 1984 г. выполнены работы по восстановлению качества оптической системы ПФ БТА, включающие устранение наклона оси главного зеркала (коллимационная ошибка), центрировку элементов корректора поля и юстировку всей оптической системы ПФ БТА. Работы по юстировке оптики нельзя считать завершенными, так как они являются частью комплексной программы, повышения точных характеристик БТА, связанной с модернизацией системы управления телескопом.

Методика контроля качества оптического изображения. Полная оптическая система ПФ БТА, расчетные характеристики которой приведены в [2], состоит из параболического главного зеркала и двухлинзового корректора поля с полеспрямляющей линзой. Основной полевой aberrацией главного зеркала является кома, а при разъюстировке оптической системы этого типа прежде всего возникают aberrации Зайделя — кома, астигматизм, и сферическая aberrация 3-го порядка [3]. Поэтому метод Гартмана, наиболее надежно восстанавливающий именно низкочастотные aberrации волнового фронта [4], является наиболее эффективным методом количественного контроля состояния юстировки оптической системы по качеству создаваемого ею изображения. Разработанная для БТА гартмановская методика изложена в работе [5], основные обозначения которой будут использованы в данной статье. При применении его в полном объеме метод Гартмана является недостаточно оперативным, особенно много времени занимает процедура точного измерения координат центров изображений на гарт-

манограммах. В то же время юстировочные работы на действующем телескопе должны были быть выполнены в заданные сжатые сроки без прерывания выполнения наблюдательных программ. Все это обусловило необходимость разработки экспрессной методики, в которой до минимума сведены затраты времени на получение гартмограмм и их обработку.

Первая часть задачи была решена применением диафрагмы в сходящемся пучке [6], а также изготовлением приставки с фотоаппаратом к штатной касете ПФ, позволяющей получать при заданной расфокусировке гартмограммы в центре поля и в трех точках поля, лежащих на расстоянии 4.5 от центра на прямых, угол между которыми составляет 120°. В результате наблюдательная процедура резко упростилась без потери точности. Получение полного материала для исследования поля ПФ занимает ~ 1 ч наблюдательного времени что при использовании сумерек вообще исключает потери плановых наблюдательных программ.

Анализ аберраций Зайделя показывает, что для их определения достаточно двух крайних зон на диафрагме Гартмана. Утрированный подход такого типа продемонстрирован в работе [7], где при юстировочных работах в качестве диафрагмы использовался входной зрачок телескопа и необходимые параметры комы находились из сдвигов центров внутреннего и внешнего краев внефокального изображения входного зрачка. Для сохранения точности определения параметров всех аберраций Зайделя и уменьшения влияния атмосферных условий мы в экспрессной методике остановились на следующей конфигурации расположения отверстий на радиальной диафрагме Гартмана: две зоны отверстий у внутреннего и внешнего краев зрачка, дополненные крестом — двумя диаметрами отверстий. Каждая зона содержит 32 отверстия, на радиусе расположено 8 отверстий, так что полная конфигурация содержит 88 отверстий. Обработка в экспрессной методике проводится по полной программе обработки одного внефокального снимка [5], координаты проекций центров отверстий диафрагмы на поверхности зеркала определялись один раз для всего периода работ.

ТАБЛИЦА 1
Сравнение данных полной и экспрессной обработки

Обработка	$d_{0.55}$	$d_{0.85}$	$d_{0.95}$	A_{10} , МКМ	A_{31} , МКМ	Φ_{31}	A_{22} , МКМ	Φ_{22}
Полная	0.96	1.39	1.74	1.72	6.73	210°	3.24	86°
Экспрессная	0.95	1.45	1.74	1.44	6.85	208	3.10	81

В табл. 1 приведены данные полной и экспрессной обработки одной и той же гартмограммы, полученной на начальном этапе работ (d_y — диаметр кружка, содержащего q -ю долю энергии, A_{ik} и Φ_{ik} — амплитуды и позиционные углы аберраций Зайделя в волновом фронте).

Данные табл. 1 иллюстрируют общий результат: в экспрессной обработке параметры наиболее важных для юстировочных задач аберраций комы и астигматизма восстанавливаются без потери точности, и только несколько снижается точность определения амплитуды сферической аберрации. Так как главное зеркало характеризуют в основном локальные ошибки поверхности [8, 9], то используемое в экспрессной методике число отверстий оказалось достаточным для надежного восстановления и размеров кружка рассеяния $d_{0.85}$. Опыт применения методики показал, что в экспрессном варианте метода Гартмана, более чем в 3 раза сокращающем время обработки одной гартмограммы, теряется только информация о распределении энергии в центральных частях кружка рассеяния и о топографии волнового фронта, в то же время параметры аберраций Зайделя и размер кружка рассеяния восстанавливаются с точностью, необходимой для юстировочных работ. Достоинства экспрессной методики особенно ярко проявились при исследовании оптики БТА в трудных атмосферных условиях (облачность, температурные перепады и т. д.), когда усреднение результатов обработки 3—4 гартмограмм позволяло получить достаточно надежные данные в течение одной ночи.

Методика юстировки линзового корректора. Линзовый корректор поля (ЛК) конструктивно представляет собой двухкомпонентную линзу с воздушным промежутком, заключенную в массивную стальную оправу. Поверхности обоих компонентов сферические, с радиусами кривизны от 6.4 до 1.2 м. Световой диаметр корректора составляет ~ 0.7 м, каждый компонент имеет массу ~ 100 кг,

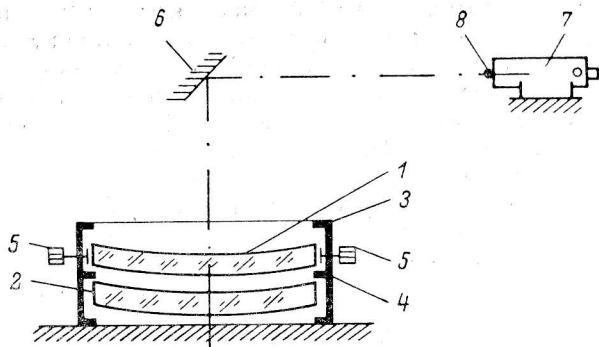


Рис. 1. Схема установки для центрирования ЛК.

1 — первый компонент; 2 — второй компонент; 3 — оправа; 4 — опорное кольцо; 5 — юстировочные винты; 6 — диагональное зеркало на штативе (не показан); 7 — прибор проверки створности ППС-II; 8 — подсвеченная диафрагма.

а корректор в целом ~ 300 кг. Указанные габариты и масса, а также ограниченный перечень специальных монтажных приспособлений определили описываемую схему и порядок работ, выполняемых в два этапа: первый этап — центрирование двух компонент корректора в оправе, второй — юстировка ЛК в составе оптики телескопа.

На рис. 1 показана схема установки для центрирования оптики ЛК. Такая установка позволяет наблюдать авторефлексионные изображения диафрагмы

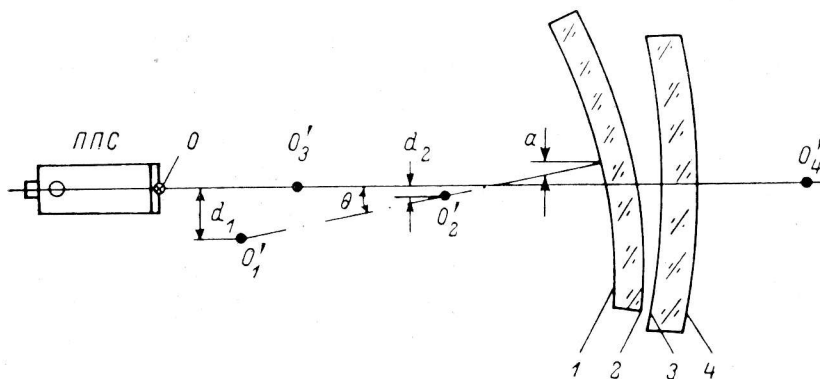


Рис. 2. Схема расположения изображений диафрагмы от сферических поверхностей ЛК. 1—4 — поверхности компонент; $O'_1-O'_4$ — соответствующие им изображения; d_1 и d_2 — измеряемые величины; α и θ — линейная и угловая составляющие децентровки.

от четырех поверхностей корректора и измерять их взаимное положение в процессе юстировки. Необходимость в подсвеченной диафрагме была вызвана тем, что штатная сетка объектива ППС не обеспечивала получение изображений достаточной яркости. Диаметр диафрагмы равен 2 мм, подсветка выполнена с помощью лампочки типа СМ, конструкция крепления виньетировала не более 10 % площади объектива. Центр диафрагмы был установлен на ось трубы ППС.

Расстояние от диафрагмы до ближайшей поверхности первого компонента было выбрано равным 2.00 м. Это обеспечило достаточное отстояние всех авторефлексионных изображений от отражающих поверхностей ЛК. Схема расположения изображений показана на рис. 2. Линия $O'_3-O'_4$, соединяющая центры кривизны поверхностей неюстируемого компонента П, была выбрана в качестве базовой. Поэтому задача юстировки состояла в совмещении точек O'_1 и O'_2 с этой

линией. Микрометрами ППС измеряются малые отрезки d_1 и d_2 от соответствующих изображений до базовой линии. Требуемые подвижки a и θ рассчитываются по формулам вида

$$a = \frac{k_1 d_2 - d_1}{k_2}; \quad \theta = \frac{d_1 - k_3}{k_4}.$$

Здесь k_1-k_4 — расчетные постоянные, зависящие от оптических параметров ЛК и взаимного положения ЛК и ППС. Заметим, что все рабочие формулы были получены с помощью аппарата матричной оптики [10], который, на наш взгляд, является весьма эффективным при решении юстировочных задач. Однако практическое осуществление рассчитанных подвижек оказалось возможным только методом последовательных приближений. Это явилось следствием непродуманной с точки зрения юстировки конструкции оправы ЛК: отсутствует регулировка наклона, а движение винтов линейной центровки изменяет наклон компонента I. После окончания центрирования ЛК был установлен так, чтобы базовая линия стала горизонтальной. Выполненное затем контрольное измерение взаимного положения компонентов обеспечило уверенность в нерасстраиваемости ЛК при эволюциях трубы телескопа.

Для выполнения второго этапа юстировки труба телескопа устанавливается в горизонтальное положение и ЛК закрепляется на штатной раме в стакане первичного фокуса (СПФ). Здесь задача юстировки состоит в том, чтобы совместить оптическую ось центрированной системы ЛК с осью подшипника компенсатора вращения поля П2. При этом предполагается, что ось П2 и оптическая

ось главного зеркала совмещены с требуемой точностью. Юстировка положения ЛК вдоль оптической оси не предусматривалась, так как корректор фиксируется технологической посадкой в расчетном положении. Схема юстировочной установки в СПФ показана на рис. 3. На первом этапе юстировки перекрестием 5 и автоколлимационным зеркалом с отверстием 4 реализуют положение оси вращения П2. Перекрестие и нормаль к зеркалу устанавливают на ось П2 с помощью ППС и автоколлимационного теодолита Т5А методом измерения смещений наблюдаемой марки (перекрестия или автоколлимационной сетки) при вращении П2. Достигнутая погрешность установки перекрестия и зеркала составила соответственно не более 0.1 мм и 0.1 угл. минуты. Далее на штатив 3 устанавливают ППС и, наблюдая перекрестие и автоколлимационное изображение сетки ППС, совмещают его визирную ось с осью вращения П2. Затем, контролируя положение авторефлексионных бликов от поверхностей ЛК относительно визирной оси ППС, корректор устанавливают в расчетное положение.

Если юстировка линз корректора продолжалась по указанным выше причинам 5 рабочих дней, то установка его в оптический тракт телескопа была выполнена за 1 день.

Результаты юстировочных работ. Все юстировочные работы были выполнены в апреле 1984 г. В результате трех последовательных подвижек коллимационная ошибка главного зеркала (рассогласование положений центра поля и оптического центра) была сведена к значению $\rho = 10'' \pm 10''$, что является пределом определения этой величины методом Гартмана. Исследования показали высокое качество юстировки полной оптической системы ПФ БТА: отсутствие постоянной комы и симметрию астигматизма, по амплитуде не превосходящего расчетного, относительно центра поля. Размеры кружка рассеяния как в центре поля системы без корректора, так и по всему полю в системе с корректором достигли значений, определяемых только качеством изготовления поверхности главного зеркала и расчетными aberrациями корректора поля. В мае 1984 г. была вынужденно выполнена дополнительная коррекция положения главного

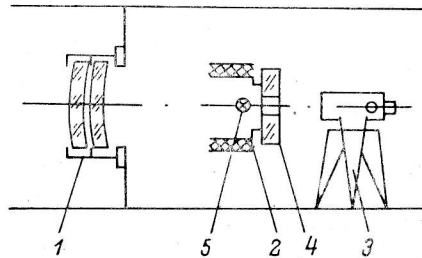


Рис. 3. Схема установки в СПФ для юстировки ЛК.

1 — ЛК; 2 — компенсатор вращения поля П2; 3 — штатив для установки теодолита или ППС; 4 — автоколлимационное зеркало с отверстием; 5 — перекрестие на оси П2.

зеркала, результаты которой проконтролировать не удалось по погодным условиям. Дальнейшие юстировочные работы были остановлены началом длительной программы исследования временных характеристик поля ошибок наведения телескопа для новой управляющей программы. Поэтому текущее состояние качества юстировки оптики ПФ БТА мы характеризуем данными, полученными методом Гартмана 0.8.10.84.

ТАБЛИЦА 2

Данные методы Гартмана для системы без корректора (центр поля)

Номер снимка	$d_{0.55}$	$d_{0.85}$	$A_{40}, \text{МКМ}$	$A_{31}, \text{МКМ}$	Φ_{31}	$A_{22}, \text{МКМ}$	Φ_{22}
20	0.59	0.96	-2.95	1.67	20°	1.05	22°
21	0.51	0.91	-2.68	1.39	32	1.17	27
22	0.48	0.87	-1.46	1.58	45	1.48	30
Среднее	0.53	0.91	-2.36	1.54	32	1.23	26
	± 0.04	± 0.04	± 0.60	± 0.10	± 8	± 0.16	± 3

В табл. 2 приведены данные для центра поля в системе без корректора (одно главное зеркало), полученные из обработки трех последовательно снятых гартманограмм. Параметры коллимационного сдвига для центра поля в системе без корректора составляют $U=1.64 \text{ мм} \pm 0.40 \text{ мм}$ и $V=2.64 \text{ мм} \pm 0.40 \text{ мм}$, т. е. амплитуда коллимационной ошибки составляет $\rho=3.11 \text{ мм} \pm 0.60 \text{ мм}$ или $\rho=26'' \pm 5''$. Исключение комы из изображения в центре поля (т. е. приведение к оптическому центру) дает концентрацию энергии $d_{0.85}=0.82 \pm 0.06$, что практически совпадает с данными цеховой аттестации главного зеркала $d_{0.9} \approx 0.8$ [8, 9]. Таким образом, в настоящее время в центре поля в системе без корректора достигнута концентрация энергии в изображении, близкая к цеховым данным. Дальнейшая юстировка уменьшит диаметр кружка рассеяния для центра поля не более чем на 0.1.

ТАБЛИЦА 3

Данные метода Гартмана для системы с корректором

Точка поля	$d_{0.55}$	$d_{0.85}$	$A_{40}, \text{МКМ}$	$A_{31}, \text{МКМ}$	Φ_{31}	$A_{22}, \text{МКМ}$	Φ_{22}
Центр	0.49	0.80	0.26	1.74	25°	1.35	32°
	± 0.03	± 0.03	± 0.10	± 0.10	± 5	± 0.15	± 6
В	0.72	1.27	-1.57	4.92	27	1.98	99
П	0.75	1.19	0.15	2.98	33	3.61	6
Л	0.72	1.10	-0.20	2.21	124	4.28	52

В табл. 3 приведены данные для системы с корректором поля, внесевые точки лежат на расстоянии 4.5 от центра поля на прямых, угол между которыми составляет 120° (В — верхняя, П — правая, Л — левая часть поля). Данные табл. 3 показывают, что в системе с корректором в центре поля характеристики изображения и волнового фронта, за исключением сферической аберрации, совпадают с таковыми для системы без корректора. На расстоянии 4.5 от центра поля размер кружка рассеяния возрастает до значения $d_{0.85}=1.19 \pm 0.06$, что соответствует расчетным характеристикам корректора [2]. Основной полевой аберрацией в системе с корректором является астигматизм, параметры астигматизма в изображении показаны на рис. 4. Можно видеть, что картина полевой астигматизма корректора симметрична, по амплитуде на краю поля астигматизм не превосходит расчетного, а сдвиг всей картины полностью определяется собственным астигматизмом главного зеркала, векторно складывающимся с полевым астигматизмом корректора.

На рис. 5 показаны параметры остаточной комы в изображении в системе с корректором. Остаточная кома системы с корректором симметрична, сдвиг всей картины полностью определяется коллимационной ошибкой главного зеркала.

Знак остаточной комы противоположен знаку полевой комы главного зеркала, так что корректор переисправляет кому главного зеркала, что должно устраняться подвижкой корректора вдоль оси. Исключив постоянную кому коллимационной ошибки из полевой комы системы с корректором, находим значение амплитуды остаточной комы в волновом фронте для края поля $A_{31} \approx 2.9$ мкм. Кому такой величины практически не влияет на качество изображения, исключение ее из изображения уменьшает диаметр кружка рассеяния только на ~ 0.1 . Сравнение данных табл. 2 и 3 показывает, что корректор вносит в волновой фронт сферическую aberrацию амплитудой $A_{40} \approx 2$ мкм, что практически не влияет на качество изображения. Главное зеркало испытывает тепловые деформации типа «эффекта края», проявляющиеся прежде всего в переменности сферической aberrации главного зеркала [9], поэтому сферическая aberrация корректора просто смещает нуль-пункт этой переменности. В момент данных исследований оптики БТА сферическая aberrация корректора даже компенсировала тепловые деформации главного зеркала (табл. 3).

В целом приведенные данные показывают, что юстировка корректора поля ПФ БТА полностью завершена и требует устранения только остаточная коллимационная ошибка главного зеркала. После ее устранения качество изображения по всему полю ПФ БТА будет определяться только качеством изготовления поверхности главного зеркала и расчетным полевым астigmatизмом корректора.

Заключение. 1. Изложенные выше методики юстировки корректора поля и контроля качества изображения успешно применены в ходе работ по юстировке оптики первичного фокуса БТА. В результате выполненных работ как в центре поля системы без корректора, так и по всему полю в системе с корректором достигнуто качество изображения, определяемое практически только качеством изготовления поверхности главного зеркала и расчетными aberrациями корректора.

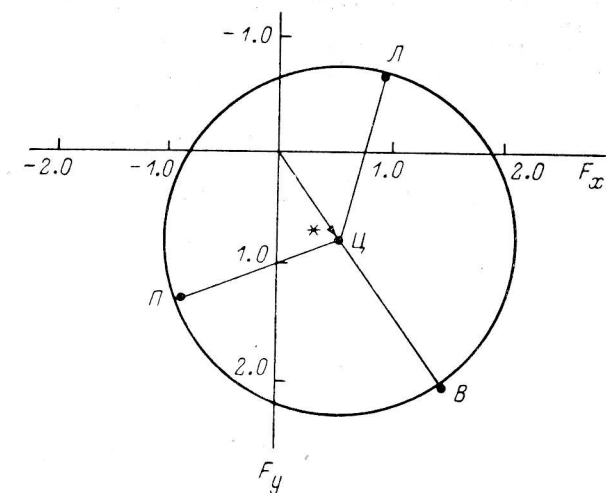


Рис. 5. Параметры комы в системе с корректором.
* — кома в центре поля главного зеркала.

Улучшение оптического изображения уже проявилось в повышении качества прямых снимков, полученных на БТА после юстировочных работ.

2. Единственной требующей устранения aberrацией остается коллимационная ошибка главного зеркала. Эта работа должна быть выполнена после завершения программы исследования поля ошибок наведения телескопа. Здесь нужно отметить, что допуск на рассогласование положений центра поля и опти-

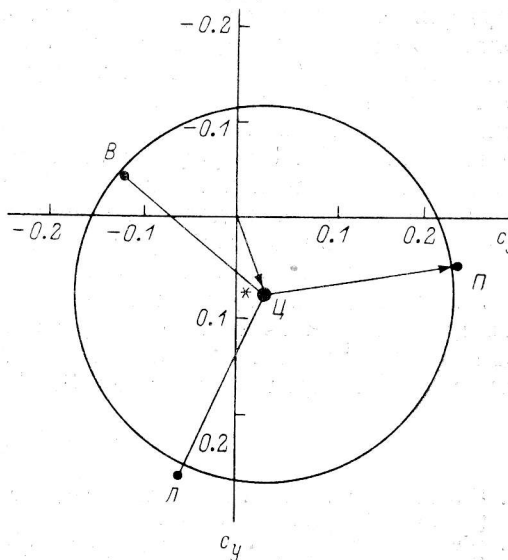


Рис. 4. Параметры астigmatизма в системе с корректором.
* — астigmatизм главного зеркала.

ческого центра, получаемый из требований точности наведения примерно на порядок более жесткий, чем вытекающий из требований качества оптического изображения.

3. Наибольшую трудность при выполнении юстировочных работ создавало отсутствие необходимых юстировочных подвижек в конструкции корректора поля. Общей тенденцией астрономического телескопостроения является ужесточение требований к качеству оптического изображения. Для современных крупных телескопов выработалось условие, что кружок рассеяния, определяемый остаточными и расчетными аберрациями, не должен превышать $0.2-0.4$. Это условие резко повышает требования к качеству оптики телескопа. Поэтому конструкции многокомпонентных корректоров поля новых телескопов обязательно должны содержать необходимые юстировочные подвижки в соответствии с расчетной чувствительностью оптической системы к децентрировке и наклонам ее элементов.

В выполнении юстировочных работ принимал участие весь коллектив сектора эксплуатации БТА. Работами по установке положения главного зеркала руководил ведущий инженер ЛОМО В. Н. Павлов. Большой объем работы по применению метода Гартмана выполнен З. У. Шагошевой.

Литература

1. Иоаннисян Б. К. Телескоп с диаметром зеркала 6 метров. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1971, 3, с. 3—19.
2. Белороссова Т. С., Мерман Н. В., Сошникова М. Д. Оптика главного фокуса БТА. — Изв. ГАО, 1975, № 193, с. 175—177.
3. Gascoigne S. C. B. Recent advances in astronomical optics. — Applied Optics, 1973, 12, N 7, p. 1419—1429.
4. Снежко Л. И. Анализ основ метода Гартмана. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1981, 14, с. 3—14.
5. Снежко Л. И. Применение метода Гартмана к исследованию главного зеркала БТА. — Астрон. журн., 1980, 57, с. 869—877.
6. Авторское свидетельство СССР № 652518 / В. А. Зверев, Р. М. Кашеринин, С. А. Родионов и др. — Бюл. изобр., 1978, № 10, с. 179.
7. Wilson R., Franza F. Recent improvements in the optical quality of the La Silla telescopes. — The Messenger, 1979, N 16, p. 12—14.
8. Снежко Л. И. Применение метода Гартмана к исследованию второго главного зеркала БТА в цеховых условиях. — Сообщ. САО, 1979, 26, с. 5—32.
9. Снежко Л. И. Результаты исследования методом Гартмана второго главного зеркала БТА. — Письма в Астрон. журн., 1980, 6, № 10, с. 667—670.
10. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978, с. 288—291.

Поступила в редакцию 30.11.84