

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 3, 22–31 (2024)

УДК 520.2

Новая оптика 1.25-м телескопа АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории

В.Ю. Тербиж, Н.М. Стешенко, А.В. Долгополов, К.А. Антонюк,
А.Н. Ростопчина-Шаховская

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
arost@crao.ru

Поступила в редакцию 1 июля 2024 г.

Аннотация. Телескоп АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) был введен в эксплуатацию в 1981 году. За 40 лет зеркало телескопа неоднократно подвергалось переалюминированию, вследствие чего поверхность зеркала деградировала, что в свою очередь привело к росту инструментальной поляризации. Учитывая параметры штатной системы телескопа, $F = 16$ м, хорошо сочетающиеся с современными приемниками излучения, а также наличие в КрАО заготовки из ситалла СО-115, была рассчитана и изготовлена новая оптическая система. Представлены данные о новой оптической системе, описаны проблемы при ее изготовлении.

Ключевые слова: телескоп, оптическая система, модернизация

1 Введение

В середине 1950-х годов, когда основным приемником излучения в астрономии еще оставалась фотопластинка, заведующий отделом физики звезд, проф. В.Б. Никонов задумал создание для КрАО телескопа, оснащенного фотометром и спектрофотометром. После консультаций с сотрудниками отдела были сформулированы основные требования к новому телескопу: высокая проникающая способность, простота управления, высокая точность наведения, возможность быстрой смены режимов наблюдения, полная автоматизация. В результате конструкторским бюро Ленинградского оптико-механического объединения (ЛОМО) был разработан телескоп, получивший обозначение АЗТ-11.

Рефлектор АЗТ-11 с апертурой $D = 1.25$ м был изготовлен ЛОМО и сдан в эксплуатацию в 1981 г. Оптическая схема телескопа (рис. 1) представляет собой версию системы Ричи – Кретьена (Ritchey–Chretien), состоящей из двух гиперболических зеркал с эксцентриситетами, заданными параметрами первого порядка и эквивалентным фокусным расстоянием F . Основные характеристики штатной системы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики штатной оптической системы АЗТ-11

Диаметр апертуры	1250 мм
Эквивалентное фокусное расстояние	15984.1 мм, $f/12.8$
Диаметр поля зрения	15' (70 мм)
Масштаб изображения	77.5 мкм/''
Квадрат эксцентриситета главного зеркала	1.04180
Диаметр вторичного зеркала	350 мм
Квадрат эксцентриситета вторичного зеркала	3.17908
Расстояние между зеркалами	3001.4 мм
Вынос изображения за вершину главного зеркала	995.0 мм
Общая длина оптической системы	3996.4 мм

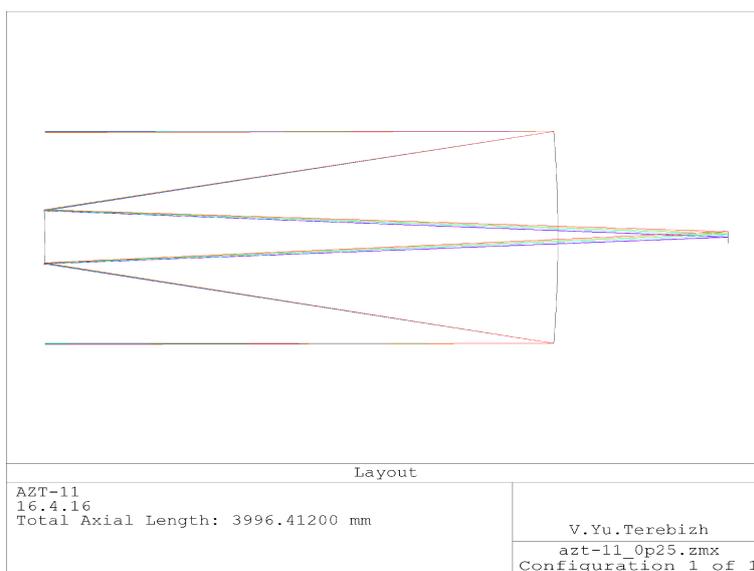


Рис. 1. Штатная (номинальная) оптическая схема телескопа АЗТ-11

Классическая двухзеркальная система, состоящая из параболического главного зеркала и гиперболического вторичного зеркала, обеспечивает субсекундное качество изображений в поле размером лишь несколько угловых минут (Максутов, 1946; Михельсон, 1976; Terebizh, 2019). Гиперболизация главного зеркала в системе Ричи – Кретьена расширяет поле зрения примерно до 15 угловых минут. Для обсуждаемого телескопа это демонстрирует рис. 2.

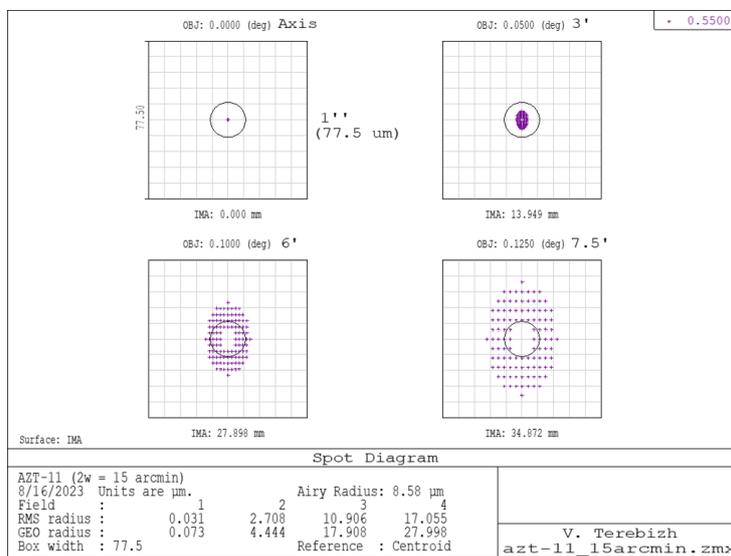


Рис. 2. Изображения точечного источника в пределах поля зрения диаметром 15' для штатной оптической системы АЗТ-11. Кружками обозначен дифракционный диск Эри; сторона квадрата соответствует 1''

Одновременно с телескопом ЛОМО была создана для него навесная аппаратура – фотометр и спектрофотометр. Между заказом телескопа и его запуском прошло более 20 лет, в результате оба прибора морально устарели. В 1982 году в фокусе Кассегрена был установлен пятиканальный фотополяриметр конструкции В. Пииролы (1975), использовавшийся в качестве штатного прибора более 40 лет. В 2005 году, учитывая круг задач, решаемых в отделе физики звезд, в фокусе Несмита был установлен ПЗС-фотометр. Так как АЗТ-11 имеет большое фокусное расстояние, перед фотометром установлен редуктор фокуса.

2 Постановка задачи

Необходимость создания новой оптики телескопа АЗТ-11 была обусловлена, прежде всего, тем обстоятельством, что за почти полувековую эксплуатацию поверхности зеркал заметно деградировали. Это повлекло за собой значительный рост инструментальной поляризации. Восстановление больших асферических поверхностей представляет собой весьма сложную задачу, решать которую в данном случае было бы неразумно, поскольку номинальная оптическая система не согласована с современными приемниками излучения: эквивалентный фокус телескопа, 16 м, слишком велик.

В КраО РАН с 1980-х годов имелась заготовка из ситалла СО-115 подходящего размера, что позволило задуматься об изготовлении для АЗТ-11 новой оптической схемы.

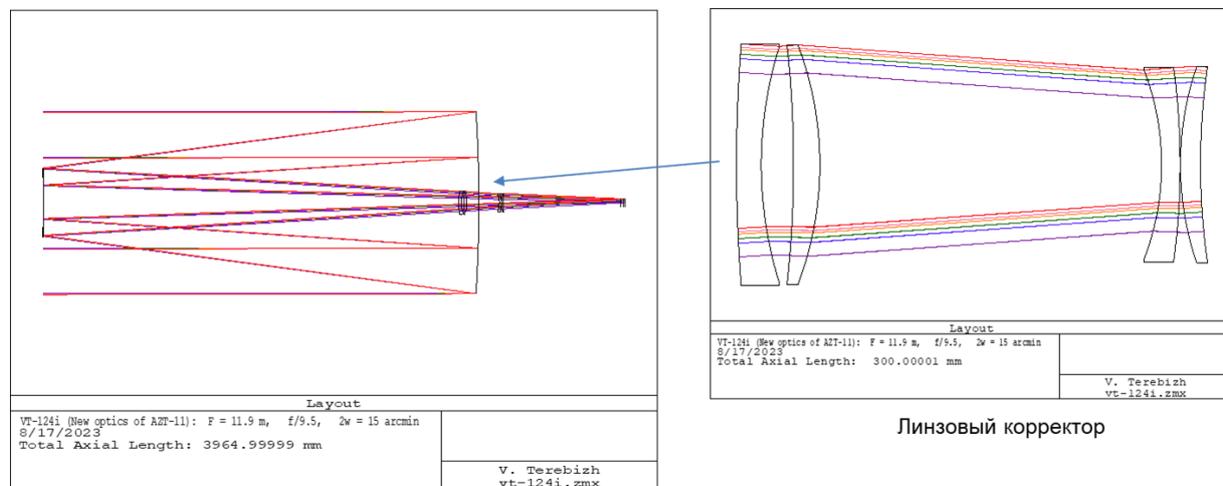
Основные требования при расчете новой оптики сводились к следующему:

- 1) достичь фокусного расстояния $F \sim 12$ м (масштаб ~ 58 мкм/");
- 2) сохранить плоское поле зрения диаметром $2w \sim 15'$;
- 3) обеспечить наблюдения в полосе U (0.34–0.38 мкм);
- 4) произвести расчет с учетом имеющейся ситалловой заготовки для главного зеркала, и других сортов стекла для изготовления прочих оптических элементов системы;
- 5) предельно упростить (имеются в виду форма и крутизна оптических поверхностей) оптические элементы с учетом возможностей оптических и механических мастерских КраО РАН;
- 6) согласовать новую оптическую систему с существующей механической конструкцией телескопа.

Кроме того, необходимо было рассчитать и затем изготовить вспомогательные оптические системы. Это связано с необходимостью использования так называемого компенсатора при контроле асферических поверхностей в процессе их изготовления. Действительно, сфера создает необходимое для контроля дифракционное изображение точечного источника света, расположенного в ее центре, тогда как в случае асферической поверхности к ней приходится присоединять вспомогательную оптическую систему, компенсатор, которая имеет в точности ту же по абсолютной величине aberrацию противоположного знака, что и испытываемая асферическая поверхность.

3 Основные результаты

В результате обсуждений научных задач, которые планируется решать с помощью телескопа АЗТ-11, неоднократных расчетов и поиска оптимальной оптической системы телескопа была выбрана схема VT-124i. Оптическая схема новой системы телескопа, VT-124i, включает в себя два зеркала – главное и вторичное – и четырехлинзовый корректор изображения, расположенный вблизи вершины главного зеркала (рис. 3).



Линзовый корректор

Рис. 3. Оптическая схема системы VT-124i (слева) и ее часть, четырехлинзовый корректор (справа)

Основное достоинство схемы – простота оптических поверхностей. Единственная асферическая поверхность – главное зеркало, которое представляет собой параболоид умеренной светосилы $f/3.8$. Уникальная особенность – сферичность формы поверхности вторичного зеркала со светосилой $f/6.7$. Известно, что контроль формы выпуклых асферических поверхностей требует изощренных средств и сложной вспомогательной оптики; в данном случае проблема контроля радикально упрощается. Четырехлинзовый корректор изображения со всеми сферическими поверхностями невелик: максимальный диаметр линз – 157 мм, длина корректора – 300 мм, все линзы изготовлены из простого базового стекла типа К8.

В новой оптической системе удалось уменьшить эффективное фокусное расстояние телескопа до ~ 12 м (было 16 м), соответствующая светосила составляет $f/9.5$ (было $f/13$), а масштаб изображения – 57.9 мкм/'' (было 77.5 мкм/''). Интегральные геометрические характеристики схемы более чем удовлетворительны: расстояние между зеркалами составляет 2970 мм при номинале 3001 мм, вынос фокуса – 995 мм при том же номинале. Разница в 31 мм расстояния между зеркалами находится в пределах штатной подвижки вторичного зеркала. Сохранение выноса фокуса означает, что положение навесных приборов для наблюдений не изменилось.

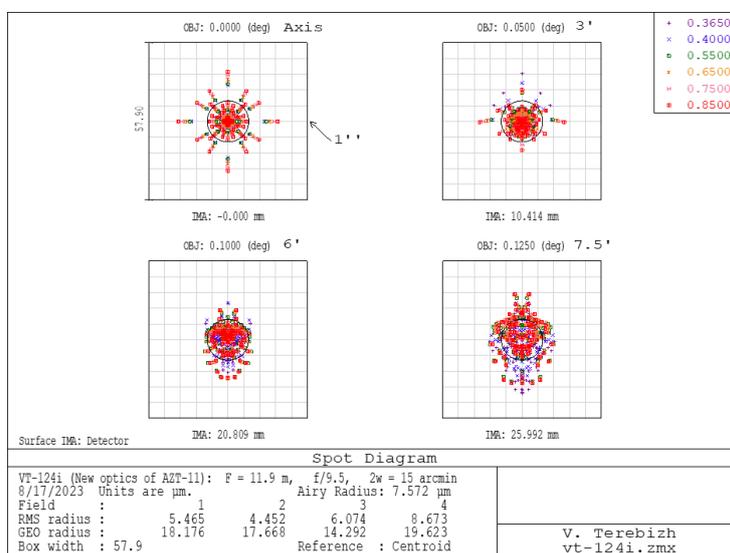


Рис. 4. Изображения точечного источника в пределах поля зрения диаметром $15'$ для оптической системы VT-124i. Обозначения те же, что на рис. 2

При расчетах оптики качество изображений оптимизировалось в спектральном диапазоне $\lambda\lambda$ 0.365–0.85 мкм, однако наблюдениям доступен более широкий диапазон, особенно в длинноволновой области. Как показывает сравнение рисунков 2 и 4, расчетное качество изображений VT-124i в поле одного и того же углового размера $15'$ превосходит номинальное, практически достигая дифракционного предела. Среднеквадратический диаметр изображений точечного источника $D_{\text{rms}} < 17.4$ мкм ($0.30''$), диаметр кружка, включающего 80 % света, $D_{80} < 31.2$ мкм ($0.54''$). Наконец, дисторсия изображения в интегральном свете не превосходит 0.2 %.

Как только новая оптическая схема была утверждена, начались работы по ее изготовлению.

Все оптические элементы новой системы – два зеркала, четыре линзы корректора изображений и три линзы компенсатора – изготовлены в КрАО мастерами Я.Н. Черныхом и В.Н. Скирутой. В механических мастерских КрАО механиками В.Н. Зубко, Л.Т. Мушкиным, А.Н. Степановым при активном участии главного инженера А.В. Долгополова изготовлены детали оправы нового вторичного зеркала, светозащитных бленд главного и вторичного зеркал.

Естественно, основные трудности были связаны с изготовлением параболоидального главного зеркала диаметром 125 см. Как пояснялось выше, для постоянного контроля формы поверхности в ходе работы используется соответствующий компенсатор aberrаций. В течение десятилетий мировая практика опиралась на компенсатор Offner, однако после грубой ошибки при создании телескопа Hubble выяснилось, что применение этого компенсатора повлекло за собой аналогичные ошибки и во

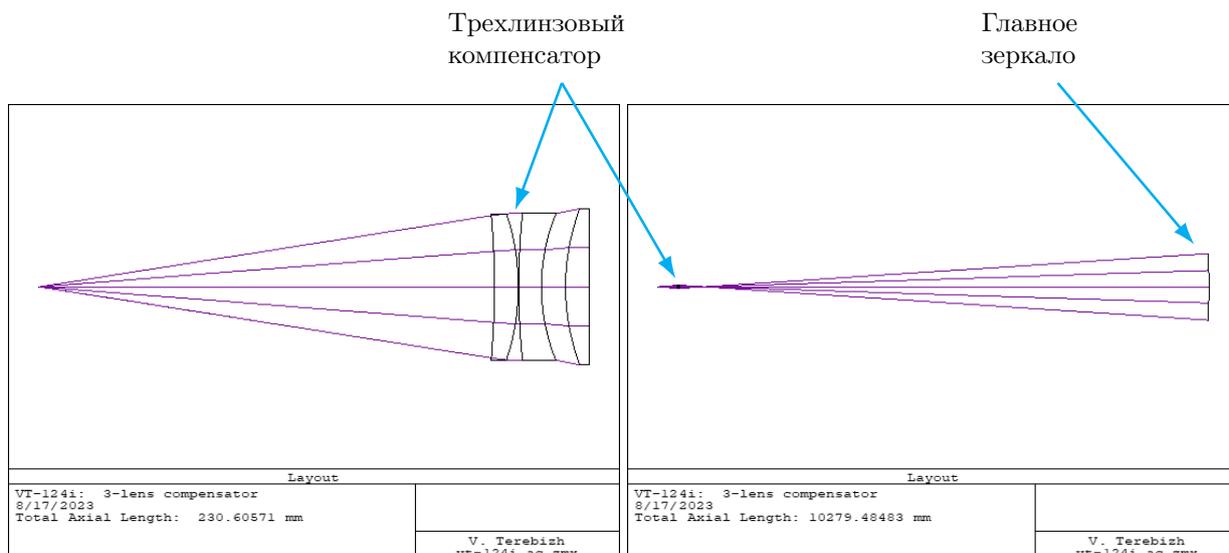


Рис. 5. Схема предварительной проверки изготовления и сборки трехлинзового компенсатора (слева) и его установка в схему контроля поверхности главного зеркала (справа)

многих других проектах. Поэтому при контроле главного зеркала применялся компенсатор нового типа (Terebizh, 2014), позволяющий выполнить предварительную проверку качества изготовления и сборки элементов его собственной оптики, и только потом установить компенсатор в схему контроля поверхности изготавливаемого зеркала (рис. 5) с должной точностью при помощи оптических методов.

Для контроля изготовления главного зеркала был выполнен расчет трехлинзового компенсатора; в соответствии с этим расчетом спроектирован неравноплечий лазерный интерферометр для контроля в горизонтальной схеме, когда контролируемое зеркало находится на планшайбе станка, повернутое на 90 градусов относительно оси вращения планшайбы (рис. 6).

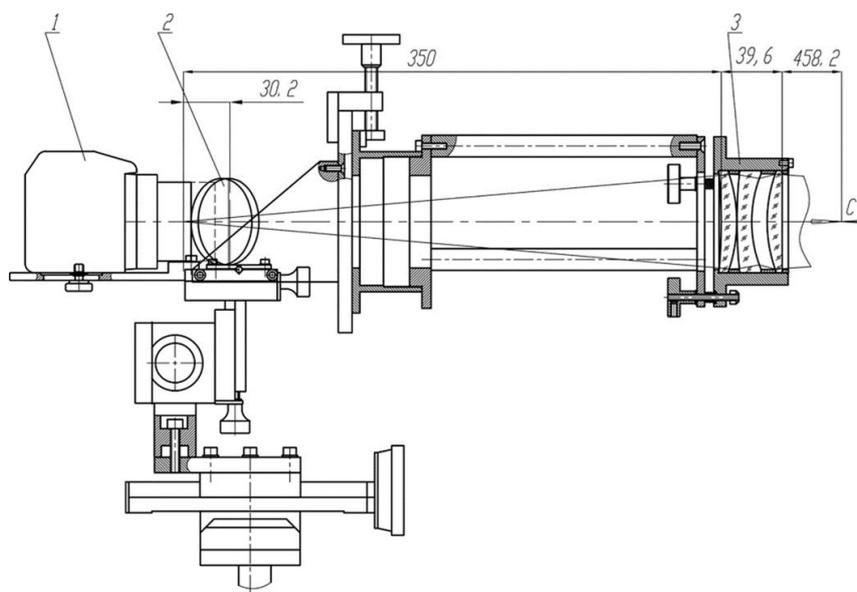


Рис. 6. Неравноплечий лазерный интерферометр для контроля изготовления главного зеркала телескопа. 1 – цифровая камера для регистрации интерферограмм, 2 – светоделительная пластина, 3 – трехлинзовый нуль-корректор в оправе с системой юстировочных подвижек, С – центр кривизны исследуемого зеркала

Линзы нуль-корректора также были изготовлены и протестированы в оптической мастерской, а оправа с системой подвижек для точной установки нуль-корректора – в механической мастерской КрАО.

В конструкции интерферометра применен стабилизированный газовый He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм с большой длиной когерентности, что в свою очередь позволяет получать контрастную интерференционную картину с четкой системой интерференционных полос. С помощью системы линз и микрообъектива в интерферометре формируется точечный источник света. Далее свет попадает на светоделительную пластину, часть его отклоняется на контролируемое зеркало, а часть проходит на эталонное зеркало. Отраженное от зеркал излучение собирается в центрах кривизны зеркал. При совмещении этих изображений формируется интерференционная картина. Нуль-корректор позволяет использовать референтный волновой фронт от точного сферического зеркала.

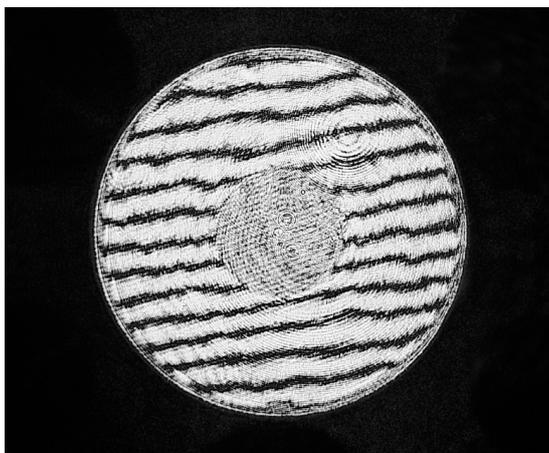


Рис. 7. Интерферограмма параболида главного зеркала диаметром 125 см

На последнем этапе, при приближении к расчетным параметрам, контроль текущего состояния производился после каждого сеанса полировки. Достигнутое качество поверхности зеркала иллюстрирует интерферограмма, представленная на рис. 7.

Вторичное зеркало (ВЗ) в новой оправе крепится за центральное отверстие, что позволило избежать применения радиальных разгрузок с термокомпенсацией (рис. 8). Толщина ВЗ была выбрана такой, чтобы обеспечить его жесткость и исключить торцевые разгрузки. Все это привело к уменьшению веса оправы и снижению трудозатрат на ее изготовление. Конструкция оправы ВЗ позволяет осуществлять юстировочные подвижки: поперечное смещение зеркала и его наклон.

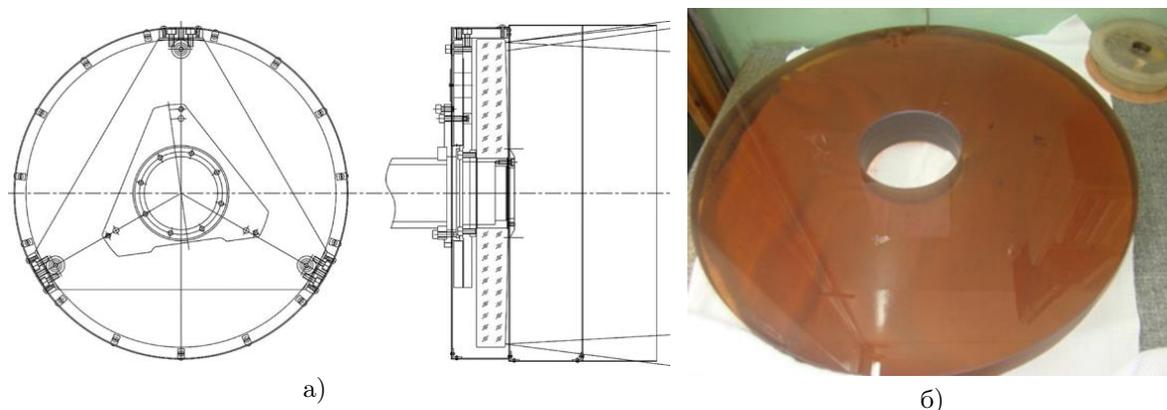


Рис. 8. Узел вторичного зеркала: а) схема крепления зеркала в оправе, б) вторичное зеркало перед нанесением покрытия

Конструкция узла четырехлинзового корректора телескопа АЗТ-11м состоит из двух оправ двух линзовых групп, собранных вместе, а также кронштейна корректора, который позволяет закрепить его на несущем кронштейне бленды главного зеркала (рис. 9).

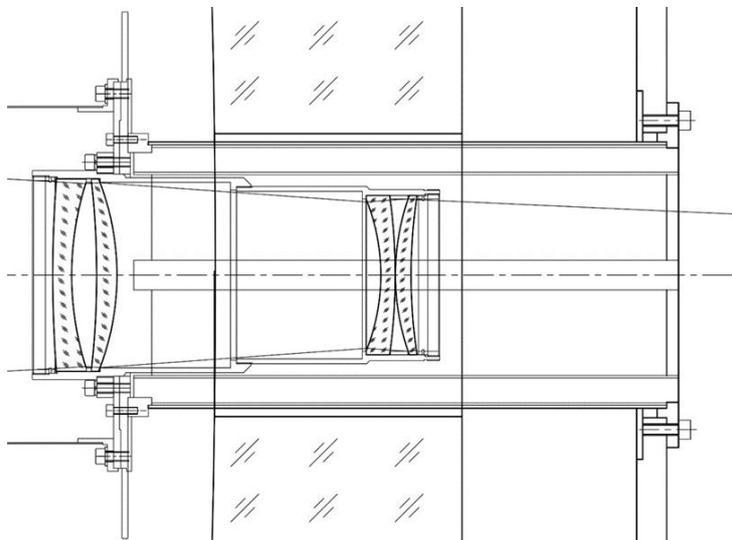


Рис. 9. Крепление четырехлинзового корректора в центральном отверстии главного зеркала

Для юстировки предусмотрены подвижка корректора вдоль оси телескопа, чтобы точно выставить положение корректора относительно главного зеркала по оси телескопа, подвижки поперек оси телескопа и наклон корректора. Все юстировочные подвижки корректора для удобства юстировки выведены на заднюю часть оправы главного зеркала снаружи телескопа. Для удобства установки корректора в телескоп на несущем стакане бленды главного зеркала были установлены направляющие с фторопластовыми пластинами. После окончательной юстировки корректора на новом фланце бленды главного зеркала предусмотрены упоры с фиксирующими винтами, которые дополнительно фиксируют положение корректора.

Финальная доводка всей оптической системы телескопа осуществлялась в автоколлимационной схеме с полноразмерным плоским зеркалом (рис. 10).

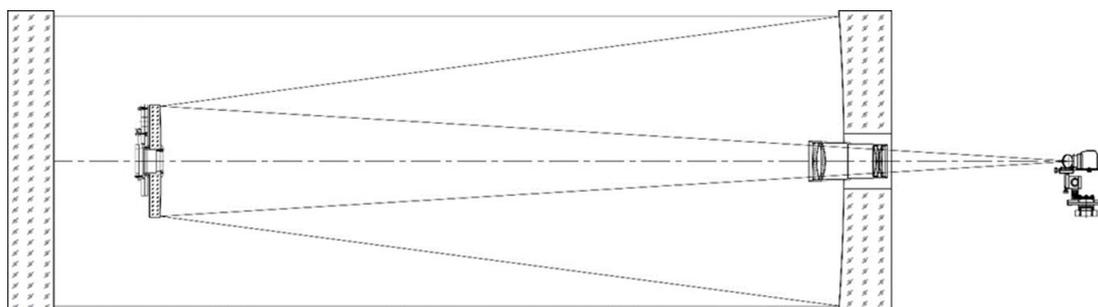


Рис. 10. Автоколлимационная схема контроля оптической системы VT-124i с полноразмерным плоским зеркалом. Слева направо: плоское зеркало диаметром 1300 мм, вторичное зеркало, главное зеркало, четырехлинзовый корректор, лазерный интерферометр

На рис. 11 приведены интерферограммы оптической системы телескопа АЗТ-11м в сборе, демонстрирующие достигнутое качество оптической системы. Искривления полос на интерферограммах в основном связаны с воздушными потоками, искажающими волновой фронт. Суммарный анализ интерферограмм проводился по большому количеству снимков, чтобы исключить эти ошибки.

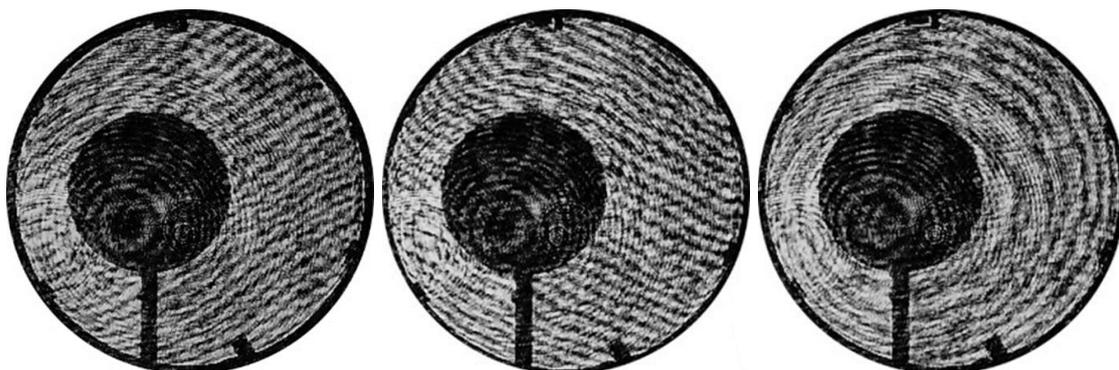


Рис. 11. Интерферограммы оптической системы телескопа АЗТ-11м в сборе с четырехлинзовым корректором

Из-за изменения материала главного зеркала на ситалл СО-115 (старое зеркало было изготовлено из стекла ЛК-5 согласно чертежу ЛОМО) возникла необходимость пересчитать термокомпенсаторы, которые компенсируют разницу коэффициентов линейного расширения материалов главного зеркала и его оправы. Конструктивно термокомпенсатор состоит из нескольких опирающихся друг на друга стаканов из материалов с различным коэффициентом линейного расширения. Расчет показал, что для зеркала из ситалла СО-115 необходима замена одного из стаканов термокомпенсатора на материал с большим коэффициентом линейного расширения. Выбор пал на полиамид, который по своим физическим свойствам отвечал требованиям конструкции термокомпенсатора. Корректность работы термокомпенсатора была подтверждена экспериментальным путем. Расчеты термокомпенсаторов и их изготовление были выполнены А.В. Долгополовым.

Вес старого главного зеркала – 670 кг, а вес нового – 620 кг. В связи разницей в весе 50 кг потребовалась тарировка 12 радиальных и 18 торцевых разгрузочных узлов. Для этого были спроектированы и изготовлены соответствующие стелды и приспособления.

При сборке системы на место вторичного зеркала было установлено плоское зеркало, после установки на телескоп в центральное отверстие главного зеркала был установлен интерферометр, система была отъюстирована. После этого плоское зеркало было заменено на вторичное, в центральное отверстие установлен корректор изображений.

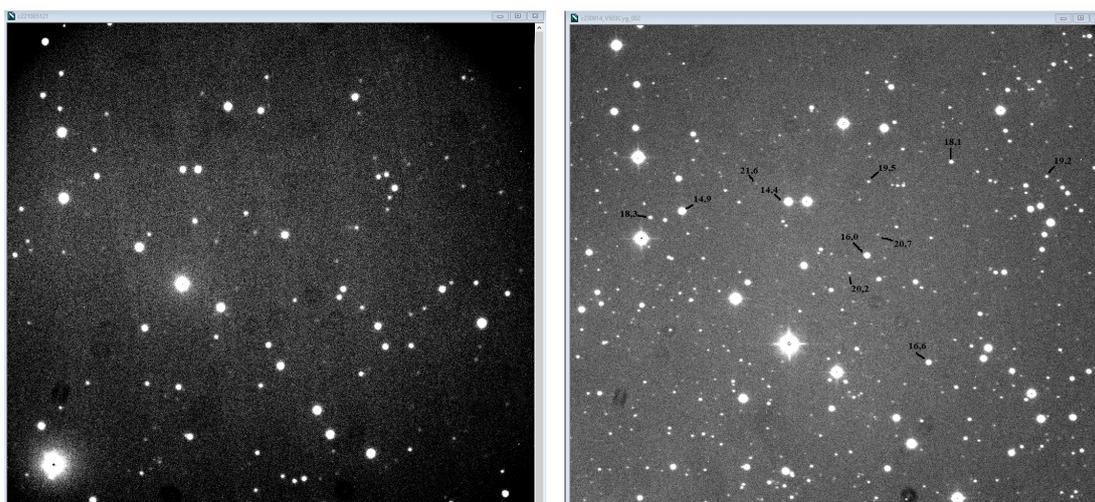


Рис. 12. Сравнение наблюдений, полученных со штатной и новой оптической системами АЗТ-11. Слева – изображение области в районе V503 Суг, полученное 05.10.2022 г. со штатной системой. Справа – изображение получено с новой оптической системой 14.09.2023 г. при аналогичных условиях наблюдений (полоса R_c, время экспозиции 180 с). На изображении подписаны звездные величины ряда объектов

К середине сентября 2023 г. все работы по смене оптической системы телескопа были закончены, был получен первый свет. Для пробных наблюдений была выбрана область в Лебеде, наблюдавшаяся ранее на АЗТ-11 со штатной системой. Сравнение наблюдений, полученных со штатной и новой оптической системами в близких погодных условиях, показало (рис. 12), что выигрыш в проникающей силе составляет порядка 1.5 звездных величин. В хорошую погоду изображения менее 1", а значит, изготовление системы и ее юстировка проведены с высокой точностью.

Наблюдения поляризационных стандартов показали, что степень инструментальной поляризации, за исключением полосы I, не выходит за пределы ошибок ее определения и составляет менее 0.1%. В полосе I степень поляризации составляет порядка 0.15%. Наблюдения на протяжении 6 месяцев показали стабильность параметров инструментальной поляризации.

4 Заключение

Первые наблюдения с новой оптической системой АЗТ-11 показали ее высокую эффективность: кроме выигрыша в проникающей силе телескопа мы получили стабильно лучшие изображения, что повышает точность наблюдений. Величина инструментальной линейной поляризации позволит выявлять более слабые эффекты ее переменности.

Благодарности. Авторы А.Н. Ростопчина-Шаховская и К.А. Антонюк от имени астрономов-наблюдателей АЗТ-11 выражают благодарность сотрудникам, принимавшим участие в изготовлении новой системы:

- гл.н.с., д.ф.-м.н. В.Ю. Теребижу – за расчет оптической системы;
- гл. инженеру проекта А.В. Долгополову – за проектирование, руководство сборкой механической части телескопа, руководство сборкой и юстировкой оптической системой телескопа;
- начальнику оптических мастерских Н.М. Степенко – за общее руководство работами.

За непосредственное изготовление элементов системы:

- оптическая мастерская: ведущему инженеру Я.Н. Черныху, шлифовщику 5 р. В.Н. Скируте, шлифовщику 5 р. С.Д. Трофименко, шлифовщику 4 р. Н.А. Аксиментьевой, шлифовщику 4 р. Р.Л. Семёновой, шлифовщику 3 р. В.В. Аксиментьеву, технику 1 кат. А.Н. Рябошапко, инженеру Е.Н. Каракозовой, инженеру Н.В. Бут, инженеру 2 кат. И.В. Бондарь;
- механическая мастерская: станочнику широкого профиля 6 р. А.П. Чепрасову, станочнику широкого профиля 5 р. А.Н. Степанову, станочнику широкого профиля 6 р. В.А. Зубко, станочнику широкого профиля 6 р. Л.Т. Муцинкину, ведущему инженеру И.В. Харченко.

Литература

- Максутов Д.Д., 1946. *Астрономическая оптика*. Гостехиздат. [Maksutov D.D., 1946. *Astronomical optics*. Gostekhizdat. (In Russ.)]
- Михельсон Н.Н., 1976. *Оптические телескопы*. М.: Наука. [Mikhel'son N.N., 1976. *Optical telescopes*. М.: Nauka. (In Russ.)]
- Terebizh V.Yu., 2014. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 440, pp. 1824–1827.
- Terebizh V.Yu., 2019. *Survey Telescope Optics*. Bellingham, WA: SPIE Press.
- Pirola V., 1975. *Ann. Acad. Sci. Fennicae, Ser. A VI – Physica*, vol. 418.

Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ. 120, № 3, 22–31 (2024)

New optics of the 1.25 m telescope AZT-11 of the Crimean Astrophysical Observatory

V.Yu. Terebizh, N.M. Steshenko, A.V. Dolgoplov, K.A. Antonyuk, A.N. Rostopchina-Shakhovskaya

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
arost@crao.ru

Abstract. The AZT-11 telescope was put into operation in 1981. Over 40 years, the telescope primary mirror has been repeatedly resurfaced. As a result, the mirror surface quality has substantially degraded, causing an increase in instrumental polarization among other adverse effects. Taking into account the parameters of the original telescope system ($F = 16$ m), which are poorly fit to modern light detectors, as well as the availability of a CO-11M sital blank of suitable size, a new optical system was designed and manufactured. We present data on the new optical system and discuss challenges of its development and manufacture as well as the techniques and methods employed.

Key words: telescope, control in manufacturing optical systems, creation of optical systems