

УДК 524.337

Автоколлимационный компенсатор для контроля асферических поверхностей. I

В.Ю. Теребиж

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
valery@terebizh.ru

Поступила в редакцию 19 декабря 2013 г.

Аннотация. Предложена оптическая схема компенсатора (нуль-корректора) для контроля асферических поверхностей, которая позволяет 1) независимо проверить оптические элементы и сборку самого компенсатора и 2) адекватно установить компенсатор в схеме контроля данной поверхности. Тем самым удастся преодолеть основные трудности, связанные с практическим использованием компенсаторов.

AUTOCOLLIMATING COMPENSATOR FOR CONTROLLING ASPHERIC OPTICAL SURFACES, *by V.Yu. Terebizh.* A compensator (null-corrector) for testing aspheric optical surfaces is proposed, which enables *i)* independently verify optical elements and assembly of the compensator itself, and *ii)* to ascertain the compensator position in a control layout for a specified aspheric surface. This makes it possible to overcome the main difficulties associated with the practical use of compensators.

Ключевые слова: телескопы, астрономическая оптика, контроль оптики

1 Введение

Как известно, контроль формы *сферической* поверхности в процессе ее изготовления нетрудно выполнить, исследуя изображение точечного источника света, размещенного в центре кривизны поверхности. В случае идеальной сферы мы должны видеть дифракционную картину Эри; отклонения от расчетной формы поверхности обычно оценивают либо качественно, с помощью ножа Фуко, либо количественным образом, накладывая на изучаемый волновой фронт референтную волну заданного профиля и анализируя получающуюся при этом интерферограмму.

Контроль *асферических* поверхностей ставит перед изготовителем существенно более сложную задачу, поскольку при отражении от асферической поверхности волны, порожденной точечным источником света, лишь в особых случаях формируется сферический волновой фронт. Предположим, например, что нужно контролировать поверхность вращения конического сечения диаметра D с осевым радиусом кривизны R_0 и квадратом эксцентриситета ε^2 . В отличие от сферы, нормали к такой поверхности сходятся не к единственной точке; для коникоида расстояние $N(y)$ между точкой схождения нормалей к зоне y и параксиальных нормалей – *абerrация нормалей* – задается простым выражением:

$$N(y) = \varepsilon^2 \cdot s(y), \quad (1)$$

где $s(y)$ – стрелка кривизны поверхности для данной зоны (предполагается, что ось z системы координат направлена вдоль оси симметрии поверхности). Например, для параболида главного зеркала телескопа имени Г.А. Шайна (ЗТШ) при диаметре 2.6 м и параксиальном радиусе кривизны 20 м стрелка кривизны, и тем самым абберация нормалей от краевой зоны, составляет $N(D/2) = D^2/8R_0 = 42.25$ мм. Если в параксиальном центре кривизны поместить точечный источник света, то диаметр отраженного от зеркала светового пучка в окрестности источника будет превосходить 11 мм, так что о контроле зеркала по изображению источника не приходится говорить.

В этих условиях контроль асферической поверхности обычно производят косвенным образом. Именно, изучаемая асферическая поверхность включается как составная часть в некоторую более обширную оптическую систему так, чтобы волновой фронт, формирующий изображение точечного источника света, стал сферическим. Наиболее простой путь заключается в *компенсации* расхождения нормалей к асферической поверхности. Соответствующие методы контроля, восходящие к Максудову (1924, 1932; см. Максудов, 1984, стр. 237) и Кудеру (1927), стали сейчас основными при контроле астрономической оптики (Вилсон, 1999; Окатов, 2004).

Обладая достаточно высокой оптической силой, компенсатор должен вносить в волновой фронт огромную сферическую абберацию, и притом строго заданной величины. Ясно, что при этом компенсаторам присущи весьма жесткие допуски, с трудом (и далеко не всегда!) реализуемые на практике. Поэтому ведущие оптические предприятия в ходе контроля поверхности используют несколько компенсаторов различного типа, и только при совпадении результатов анализа форма поверхности считается выясненной.

Заметим в этой связи, что известная ошибка при изготовлении главного зеркала телескопа имени Э. Хаббла, связанная с неправильной юстировкой двухзеркального компенсатора Оффнера, по существу была обусловлена пренебрежением результатами анализа, полученными с другим – двухлинзовым компенсатором. Вилсон (1999) указывает, что в ряде случаев при изготовлении зеркал для больших наземных телескопов были допущены столь же значительные ошибки, как и для телескопа Хаббла, однако они не вызвали общественного резонанса.

Чрезвычайная жесткость допусков изготовления и установки компенсаторов заставляет уделять особое внимание возможностям независимой проверки самого компенсатора и его положения в схеме контроля. В литературе описаны несколько схем, отчасти удовлетворяющих этим условиям (Пуряев, 1976; Вилсон, 1999). Настоящая работа представляет новую схему компенсатора, которая позволяет *без привлечения сторонних устройств проверить его оптические элементы и сборку, а затем с должной точностью установить компенсатор в схеме контроля изучаемой поверхности*. Как следствие, дефекты волнового фронта, остающиеся видимыми после выполнения двух указанных процедур, с определенностью можно отнести к неточностям изготовления самой асферической поверхности.

Описываемая ниже конкретная схема компенсатора была рассчитана несколько лет тому назад в связи с предполагаемой заменой главного зеркала ЗТШ (Теребиж, 2009). В последующем компенсатор был изготовлен В.Н. Скирутой и В.Н. Черных в оптической мастерской КрАО под руководством Н.В. Стешенко. Компенсатор будет использован по достижении соответствующей стадии работ над главным зеркалом.

2 Компенсатор в автоколлимационной моде

Описание предлагаемой оптической схемы удобно провести на конкретном примере асферического зеркала, а именно – нового главного зеркала ЗТШ. Оно должно иметь форму парабоида с радиусом кривизны 20.0 м.

Компенсатор состоит из трех сферических линз небольшого размера, сделанных из одного материала (рис. 1). В данном случае было выбрано простое и надежное стекло К8; его аналогами в каталогах фирм Ohara и Schott являются, соответственно, S-BSL7 и N-BK7. Световые диаметры линз не превосходят 70 мм (табл. 1). Задняя поверхность третьей линзы намеренно сделана плоской.

На рис. 1 показано использование компенсатора в проверочной – автоколлимационной моде (назовем ее для краткости ‘А’). Если установить точечный источник света S на заданном расстоянии L

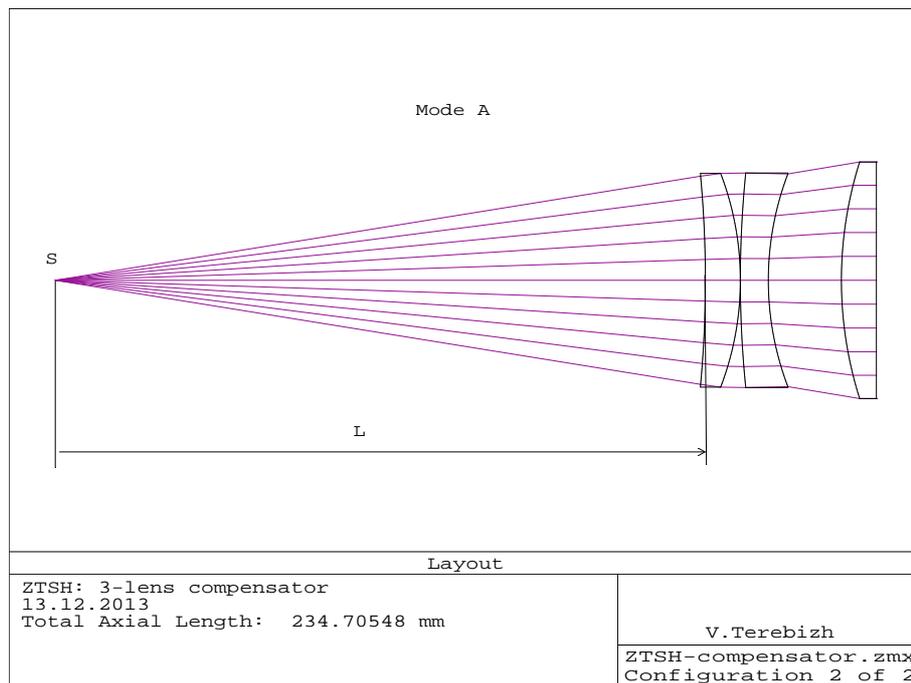


Рис. 1. Проверка характеристик компенсатора в автоколлимационной моде

от вершины первой поверхности компенсатора (в данном случае $L = 185.82$ мм), то после отражения от шестой (плоской) поверхности свет проходит компенсатор в обратном направлении, формируя изображение в том же месте S, где расположен источник света. Для увеличения яркости света, отраженного от шестой поверхности, можно приложить к ней плоское зеркало высокого качества. Одним из обычных способов изображение отводится в сторону; его качество говорит о приемлемости изготовленной модели компенсатора. Очевидно, наивысшей чувствительности при тестировании компенсатора можно достичь, обеспечив дифракционное качество изображения; в данном случае это требование выполнено (рис. 2). Среднеквадратическая ошибка волнового фронта для длины волны 0.6328 мкм He-Ne лазера составляет $\lambda/135$.

Работа в моде A предполагает достаточно высокую точность установки источника света. Как известно (см., например, Пуряев, 1976, стр. 187), при использовании микроскопа продольная точность установки δz по изображению источника определяется апертурным углом u :

$$\delta z \approx 0.2/u^2, \quad (2)$$

где u измеряется в радианах. В данном случае апертурный угол $u = 9^\circ.4 = 0.16$ радиана, так что точность продольной установки источника с помощью микроскопа $\delta z \approx 8$ мкм. Эта величина находится в пределах допусков (см. ниже раздел 4).

3 Компенсатор в моде контроля заданной поверхности

Основная мода (обозначим ее посредством 'C') отвечает использованию компенсатора для контроля испытуемой асферической поверхности (рис. 3).

Описание схемы контроля зеркала с компенсатором в моде C дано в табл. 2. Поскольку характеристики собственно компенсатора остаются идентичными в обеих модах, отличия данных в табл. 1

Таблица 1. Характеристики схемы проверки компенсатора в автоколлимационной моде А

Поверхность	Комментарий	Радиус кривизны (мм)	Расстояние до следующей поверхности (мм)	Материал	Световой диаметр (мм)	Квадрат эксцентриситета
Источник	-	∞	185.82	-	0	-
1	Линза 1	-330.893	10.0	K8	60.0	0
2	"-	-86.95	0.0	-	61.6	0
3	Линза 2	311.82	8.0	K8	61.9	0
4	"-	86.95	20.88	-	61.3	0
5	Линза 3	114.14	10.0	K8	68.2	0
6	"-	∞	-10.0	Зеркало	68.2	0

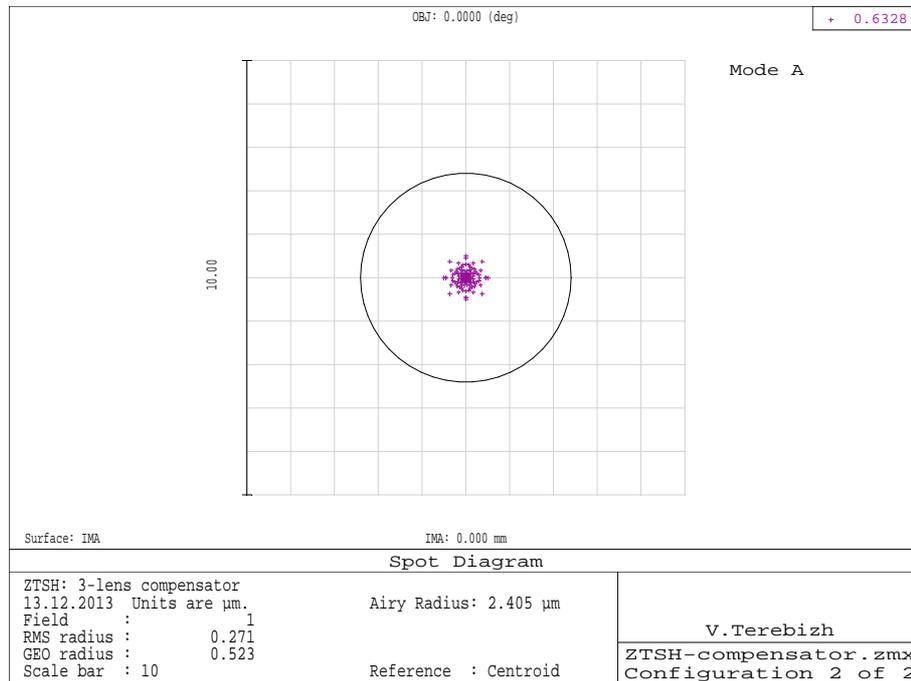
**Рис. 2.** Точечная диаграмма компенсатора в автоколлимационной моде. Масштабный отрезок соответствует 10 мкм, окружность диаметром 4.8 мкм – диску Эри при длине волны 0.6328 мкм

Таблица 2. Характеристики схемы контроля зеркала ЗТШ с компенсатором в моде С

Поверхность	Комментарий	Радиус кривизны (мм)	Расстояние до следующей поверхности (мм)	Материал	Световой диаметр (мм)	Квадрат эксцентриситета
Источник	–	∞	330.893	–	0	–
1	Линза 1	-330.893	10.0	К8	60.0	0
2	–"	-86.95	0.0	–	61.1	0
3	Линза 2	311.82	8.0	К8	60.3	0
4	–"	86.95	20.88	–	58.8	0
5	Линза 3	114.14	10.0	К8	62.0	0
6	–"	∞	20515.1	–	61.5	0
7	Испытуемое зеркало	-20000.0	-20515.1	Зеркало	2600	1.0

и табл. 2 касаются только расстояния от источника света, диаметров световых пучков и введения в схему испытуемого зеркала.

Одна из особенностей компенсатора состоит в том, что передняя поверхность первой линзы вогнута, причем ее радиус кривизны по абсолютной величине равен расстоянию от источника света, в данном случае $R_1 = -330.89$ мм (табл. 2). Таким образом, рассматривая сначала отражение света от первой поверхности, мы имеем возможность с оптической точностью выставить удаление источника от компенсатора, а затем, *двигая источник света вместе с компенсатором* и наблюдая изображение источника в полной схеме контроля, выставить и расстояние до вершины испытуемой поверхности.

В моде С апертурный угол $u = 5^\circ.3 = 0.09$ радиана, и формула (2) оценивает продольную точность установки источника света величиной $\delta z \approx 24$ мкм, что также входит в пределы допусков полной схемы контроля.

Как свидетельствует рис. 4, при надлежащей установке компенсатора он обеспечивает дифракционное качество изображения точечного источника света. В моде С среднеквадратическая ошибка волнового фронта для длины волны 0.6328 мкм составляет $\lambda/143$, т. е. того же порядка величины, что и в моде А. Тем самым возможное несовершенство изображения следует приписать только ошибкам испытуемой поверхности зеркала. Конкретное распределение ошибок поверхности соответственно видам aberrаций определяется разложением по ортогональным на кольце полиномам Цернике (Нолл, 1976; Махаджан, 1981). Соответствующая программа синтеза и анализа интерферрограмм *FRANSY* была создана нами в 2003 г.

В общем случае трехлинзовый компенсатор обладает следующими двумя основными особенностями:

- Существует положение точечного источника, при котором свет дважды проходит через все линзы и формирует дифракционное изображение в месте расположения источника. Это дает возможность обнаружить малые отклонения от расчетных характеристик не только самих линз, но и их взаимного положения.
- Радиус кривизны первой поверхности равен по абсолютной величине расстоянию компенсатора от источника света, что позволяет корректно выставить как это расстояние, так и удаление компенсатора от испытуемого зеркала.

Помимо этих, при расчете компенсатора для главного зеркала ЗТШ удалось реализовать несколько дополнительных свойств, облегчающих его изготовление:

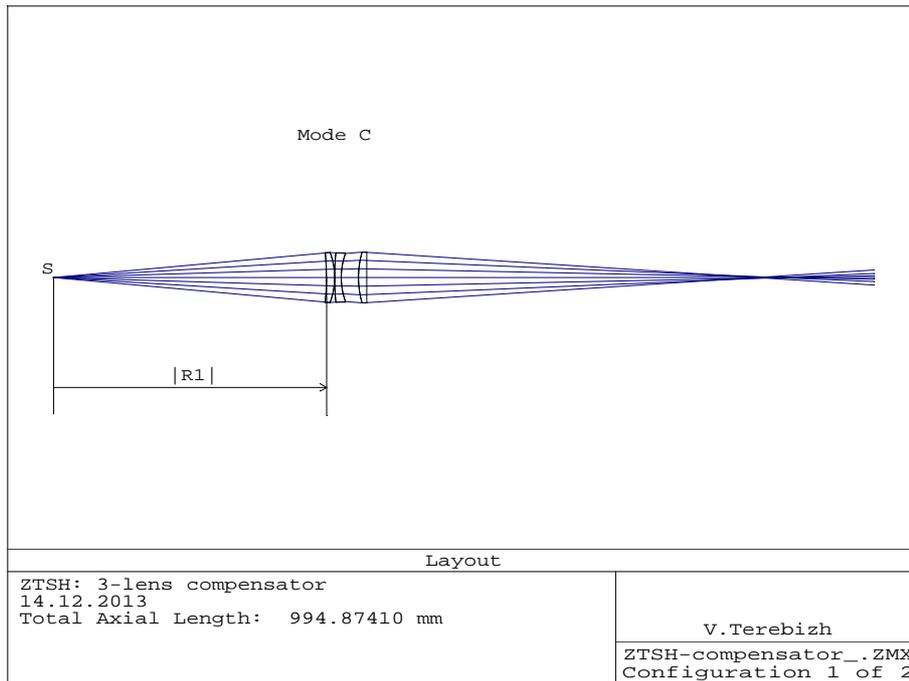


Рис. 3. Компенсатор в режиме контроля зеркала (последнее расположено далеко справа и потому не показано)

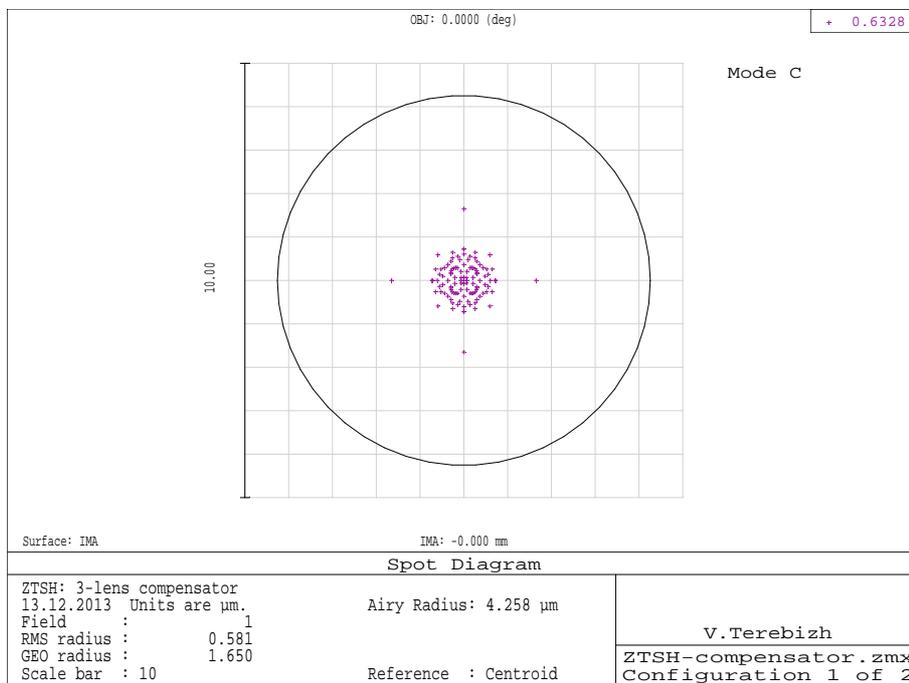


Рис. 4. Точечная диаграмма в режиме контроля зеркала ЗТШ. Масштабный отрезок соответствует 10 мкм, окружность диаметром 8.5 мкм – диску Эри при длине волны 0.6328 мкм

- Радиус задней поверхности второй линзы (№ 4 в схеме) равен по величине и противоположен по знаку радиусу кривизны задней поверхности первой линзы (№ 2 в схеме). Это позволяет весьма точно проверить указанные поверхности путем наложения их друг на друга в интерферометре Физо.
- Первая и вторая линзы касаются друг друга, что облегчает сборку (температурные изменения не снижают заметным образом качества изображений).
- Наконец, следует отметить, что световой диаметр компенсатора невелик. То же относится и к суммарной толщине линз. Небольшие размеры компенсатора дают возможность выбрать однородную заготовку стекла, из которой будут изготовлены линзы.

4 Допуски

Поскольку компенсатор для ЗТШ рассматривается здесь лишь в качестве иллюстративного примера, приводить полную совокупность допусков на его параметры нецелесообразно. Мы лишь укажем характерные величины допусков.

Допустимые вариации радиусов поверхностей находятся в интервале от 0.03 мм до 0.20 мм. Вообще говоря, при расчете компенсатора нетрудно подогнать значения всех радиусов к стандартной сетке пробных стекол, и тогда реализация этой части требований не составит трудностей. Допуски на иррегулярность поверхностей составляют 0.2 ширины интерференционной полосы для длины волны 0.6328 мкм.

Допуски на толщины линз и расстояния между ними лежат в диапазоне 0.04–0.10 мм. Поперечные смещения и наклоны линз не должны превосходить, соответственно, 0.02 мм и 0.01° .

Наконец допуски на показатели преломления стекла составляют ± 0.0003 для первых двух линз и ± 0.0001 – для третьей линзы. Показатели дисперсии всех линз могут варьировать в пределах ± 0.50 .

Приведенные выше допуски достаточно требовательны, однако характерны для всех типов компенсаторов. Вообще говоря, и при выходе за допустимые пределы сохраняется возможность выполнить контроль с компенсатором. *Для этого нужно знать реальные значения параметров компенсатора и реальное его положение с тем, чтобы в дальнейшем учесть эту информацию при анализе интерферограммы в рамках решения обратной задачи* (Теребиж, 2005).

5 Заключительные замечания

Предложенный компенсатор можно рассматривать как развитие трехлинзовой схемы, рассчитанной Д.Т. Пуряевым (1976) для контроля 6-м зеркала БТА. В компенсаторе Пуряева “установочное” отражение света происходит не от первой поверхности, как у нас, а от передней поверхности второй линзы, что вносит очевидную неопределенность: ошибка в расстоянии компенсатора от источника может быть нивелирована отклонениями геометрических параметров первых двух линз или показателя преломления первой из них. Однако принципиальное различие схем определяется тем фактом, что компенсатор Пуряева нельзя независимо проверить в сборе. В нашем компенсаторе это выполняется с помощью автоколлимационного отражения света при заданном удалении компенсатора от источника света. Заметим также, что компенсатор Пуряева обеспечивает не столь высокое качество изображения.

Таким образом, добавление одной линзы к известному компенсатору Оффнера (1963) позволяет достаточно просто решить задачи проверки качества самого компенсатора и правильности его установки в схеме контроля.

Приведенный выше конкретный расчет трехлинзового компенсатора предназначен для контроля главного зеркала ЗТШ с относительным фокусным расстоянием $F/D \equiv \phi = 3.83$. Понятно, что компенсаторы того же типа можно рассчитать и для не столь светосильной оптики. Было бы интересно выяснить границу с другой стороны – для светосильных поверхностей с $\phi < 3.8$. При

фиксированной светосиле испытуемого зеркала эта граница зависит также от его диаметра и асферичности.

Автор признателен Ю.С. Иванову, А.Ф. Лагутину и Н.В. Стешенко за полезное обсуждение статьи.

Литература

- Вилсон (Wilson R.N.) // Reflecting Telescope Optics. 1999. V. II. Springer.
- Кудер (Couder A.) // Rev. d'Opt. 1927. № 6. P. 49.
- Максутов Д.Д. // Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука. 1984.
- Махаджан (Mahajan V.N.) // Journ. Opt. Soc. Am. 1981. V. 71. P. 75.
- Нолл (Noll R.J.) // Journ. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. P. 207.
- Окатов М.А. // Справочник технолога-оптика. СПб: Политехника. 2004.
- Оффнер (Offner A.) // A Null Corrector for Paraboloidal Mirrors. Applied Optics. 1963. V. 2. N. 2. P. 153.
- Пуряев Д.Т. // Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение. 1976.
- Теребиж В.Ю. // Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: Физматлит. 2005.
- Теребиж В.Ю. // Юстируемый компенсатор для контроля асферических поверхностей. Отчет КрАО. 2009.