

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕЛЕСКОПА БТА

*М. В. Лобачев, Л. Е. Якунова*

Рассмотрена оптическая схема телескопа БТА, имеющая систему первичного фокуса и систему неподвижного фокуса. В схеме неподвижного фокуса описаны системы, обеспечивающие работу телескопа при различных относительных отверстиях и различных полях зрения. Для каждой системы даны абберационные характеристики. Абберации приведены в виде кружка рассеивания, выраженного в угловой мере. Для системы 1 : 30.74 даны абберации для точки на оси в случае вывода вторичного зеркала, входящего в систему неподвижного фокуса без корректора, из положения, в котором сферическая абберация исправлена.

The optical arrangement of a BTA-type telescope is considered. It includes the primary focus and the fixed focus system. The latter contains optical units which provide operation of the telescope at different relative apertures and different fields of view. Aberration characteristics for each unit are given. Aberrations are presented in the form of scatter circle expressed in angular measures (seconds of arc). For the system 1 : 30.74 aberrations are shown for a point on the axis when the secondary mirror, serving the fixed focus system without the corrector, is removed from the position in which the spherical aberration is corrected.

### Введение

За последнее время построено и установлено несколько отечественных телескопов. По своим размерам они относятся как к средним, так и к мелким — это телескопы ЗТШ, ЗТЭ АЗТ10 и некоторые другие. Естественно, возник вопрос о строительстве крупного, уникального по своим размерам инструмента. Таким астрономическим прибором явился Большой телескоп азимутальный (БТА). В конструкции телескопа БТА были осуществлены системы неподвижного и прямого фокуса. Система неподвижного фокуса имеет одно выпуклое гиперболическое и одно плоское диагональное зеркала.

Фокальная плоскость системы первичного фокуса расположена в специальной кабине аналогично конструкции 200-дюймового телескопа в США. Такое расположение удобно и не требует создания никаких дополнительных оптических устройств.

Фокальная плоскость системы вторичного фокуса расположена на специальном балконе, на котором находятся входные устройства измерительной аппаратуры.

Для больших телескопов важнейшим фактором, характеризующим их коэффициент полезного действия, является концентрация энергии в пятне рассеивания. Чем меньше пятно рассеивания, создаваемое турбуленцией воздуха, и чем лучше изготовлены оптические детали, тем информационно эффективнее телескоп.

Концентрация энергии определяется ее процентным содержанием, отнесенным к телесному углу, выраженному в угловых секундах. Качество расчета на абберации обычно бывает значительно выше качества изображения, определяемого турбуленцией и качеством изготовления главного зеркала. Для лучшей ориентации мы считаем целесообразным при расчете аббераций выразить абберационные характеристики систем, служащих для фотографирования участков неба, в угловых секундах.

ТАБЛИЦА 1

Система	Фокусное расстояние, мм	Относительное отверстие	Поле зрения		Масштаб изображения 1"/мм
			угловое	линейное, мм	
Первичный фокус без корректора	24 000	1 : 4	2'00"	14	0.116
с корректором	24 680	1 : 4.11	9 45	70	0.120
Неподвижный фокус с линзовой укорачивающей системой	87 700	1 : 14.62	3 55	100	0.425
без корректора	184 400	1 : 30.74	1 52	100	0.894
с линзовой удлиняющей системой	349 400	1 : 58.2	1'	101.6	1.693
с линзовой системой для работы ИПФ	188 400	1 : 31.40			0.919

В табл. 1 приведены основные оптические системы, используемые при работе телескопа.

### Система первичного фокуса без корректора

При работе в первичном фокусе оператор находится в специальной кабине, размещенной в ходе светового пучка, падающего на главное зеркало телескопа. Кабина наблюдателя имеет диаметр 1800 мм. Центральное виньетирование, вызываемое кабиной и рассчитанное по площади, составляет 9%. На рис. 1 изображена оптическая схема системы первичного фокуса, работающего без дополнительных корригирующих элементов; здесь  $I$  — главное

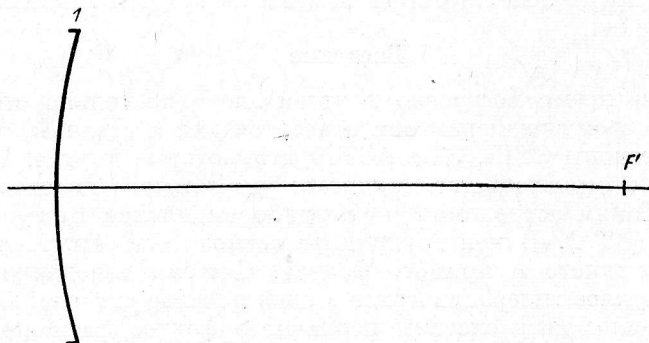


Рис. 1. Оптическая схема главного зеркала без корректора.

зеркало,  $F'$  — фокус этого зеркала. Качество изображения определяется комой. Для расчета меридианной комы  $K$  может быть применена известная формула

$$K = 3m^2 w S_{II} / 2f', \quad (1)$$

где  $m$  — высота луча в зрачке телескопа;  $f'$  — фокусное расстояние системы;  $w$  — угол главного луча с оптической осью, определяющий поле зрения;  $S_{II}$  — коэффициент аббераций третьего порядка, характеризующий кому системы.

Для параболического зеркала кома не зависит от положения зрачка и коэффициент комы  $S_{II}$  имеет значение, равное  $1/2$ . Конструктивные элементы системы определяют кому. Для телескопа БГА  $m=3000$  мм,  $f'=24000$  мм. При этих условиях  $K=-2.84 \cdot 10^2 w$ . Для поля зрения  $w=2'$  кома составляет 0.165 мм.

В табл. 2 приведены значения концентрации энергии в пятне рассеивания данной системы в зависимости от величины поля зрения.

ТАБЛИЦА 2

Поле зрения		Концентрация энергии, %	Диаметр пятна рассеивания
в мм	в угловой мере		
10	1'24"	100	0.5
14	2'	86	0.5
		96	0.75
		100	1.0

Система первичного фокуса с корректором

В первичном фокусе предусмотрена система-корректор, рассчитанная Д. Д. Максудовым, увеличивающая поле зрения до 10' при том же относительном отверстии 1 : 4. Конструктивно корректор состоит из двухлинзового компенсатора и полеспрямляющей линзы. Двухлинзовый компенсатор установлен на расстоянии 1/10 фокусного расстояния от плоскости изобра-

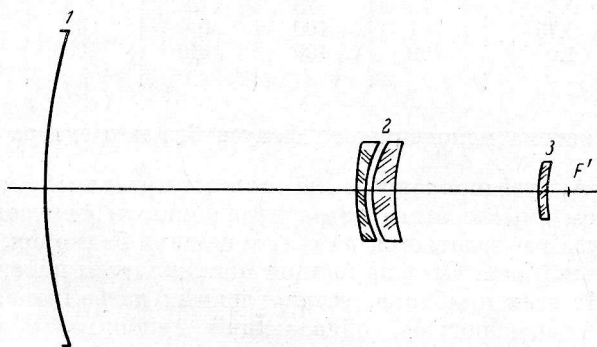


Рис. 2. Оптическая схема главного зеркала с корректором аберрации.

жения и имеет диаметр около 700 мм. Все линзы изготовлены из оптического стекла марки К8. Обозначим  $r_i$  — радиус поверхностей линз;  $r_{0i}$  — радиус поверхности, имеющей асферическую форму в точке пересечения ее оптической осью;  $d_i$  — расстояние между вершинами поверхностей;  $n_{\lambda i}$  — показатель преломления материала, из которого изготовлен корректор (для выделения спектральной линии внизу указывается обозначение длины волны  $\lambda$  этой линии);  $e^2$  — квадрат эксцентриситета;  $i$  — порядковый номер

ТАБЛИЦА 3

		$n_1 = -1.0$		Световой диаметр
$r_{01} = 48000$				6000
$r_8 = 6427$	$d_1 = 21451$	$n_2 = 1.0$		701
$r_3 = 2377$	$d_2 = 50$	$n_3 = 1.5163$	К8	688
$r_4 = 1270.6$	$d_3 = 4$	$n_4 = 1.0$		684
$r_5 = 1855.5$	$d_4 = 70$	$n_5 = 1.5163$	К8	668
$r_6 = 774.4$	$d_5 = 2405.5$	$n_6 = 1.0$		75
$r_7 = 1018.6$	$d_6 = 16$	$n_7 = 1.5163$	К8	73
		$n_8 = 1$		
$s' = 9.4$				
$f' = 24421$				

конструктивного элемента по ходу света;  $s'$  — расстояние от последней поверхности до фокальной плоскости. После расчета системы и ее оптимизации получены конструктивные элементы, приведенные в табл. 3.

На рис. 2 приведена оптическая схема системы 1:4.1 с корректором aberrаций. Приняты следующие обозначения: 1 — главное зеркало, 2 — корректор aberrации, 3 — полевая линза,  $F'$  — фокус системы с корректором aberrаций.

В табл. 4 приведены значения концентрации энергии в пятне рассеивания системы первичного фокуса с корректором aberrаций. Эти значения даны в зависимости от величины поля зрения и длины волны.

ТАБЛИЦА 4

Поле зрения		Диаметр пятна рассеивания	Концентрация энергии в % при длинах волн $\lambda$ в нм					
в мм	в угловой мере		365	404	434	486	589	656
50	7'	0.5	100	100	100	100	97	92
		0.75	100	100	100	100	100	100
70	10'	0.5	76	75	78	78	70	76
		0.75	97	100	100	100	100	92
		1.0	100	100	100	100	100	100

#### Система неподвижного фокуса без корректора

Телескоп БТА, установленный на альтазимутальной монтировке, не обладает в полном смысле этого слова неподвижным фокусом. Система неподвижного фокуса располагается на одном из двух балконов, вращающихся вокруг вертикальной оси. Свет на балкон направляется плоским диагональным зеркалом. Из всех приборов, установленных на балконе, основным называем звездный спектрограф, обладающий наибольшей дифракционной решеткой. Относительно этого спектрографа устанавливается вторичное гиперболическое зеркало телескопа.

Введем обозначения:  $d$  — расстояние между главным параболическим зеркалом и вторичным гиперболическим,  $t$  — расстояние от главного зеркала до фокальной плоскости телескопа (плоские зеркала во внимание не принимаются);

$$d = (t - 1)/(\varphi_1 + 1), \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  — оптическая сила главного зеркала при условии, что сила всей системы вторичного фокуса равна единице. Величина  $t$  также рассчитывается при оптической силе всей системы, равной единице. Следует принимать величину  $\varphi_1$  положительной (так как главное зеркало по своему оптическому действию соответствует положительному компоненту). Оптическая сила вторичного зеркала  $\varphi_2$  определяется из выражения

$$\varphi_2 = (1 - \varphi_1)/(1 + \varphi_1 d). \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) определяют положение и оптическую силу вторичного зеркала.

Система вторичного фокуса рассчитывается с учетом исправления сферической aberrации. Aberrации поля при этом остаются неисправленными.

Сферическая aberrация исправляется тем, что вторичное зеркало изготавливается гиперболическим. Его эксцентриситет определяется из следующего выражения:

$$e_2 = (\varphi_1 + 1)/(\varphi_1 - 1). \quad (4)$$

Система вторичного фокуса имеет относительное отверстие 1:30.74. Она дает изображение участка неба, увеличенное в 7.6 раза по сравнению



с системой первичного фокуса. Ее можно считать системой неподвижного фокуса, так как приборы, установленные в ней, неподвижны относительно основания. Конструктивные элементы этой системы приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5

$r_{01} = -48000$	$e_1^2 = 1$	$d_1 = -21048.33$	$n_1 = 1$
$r_{02} = -6786.65$	$e_2^2 = 1.68805$		$n_2 = -1$
$f' = 184398.95$			$n_3 = 1$
$s' = 22678.57$			

На рис. 3 приведена оптическая схема этой системы, здесь 1 — главное зеркало; 2 — вторичное гиперболическое зеркало; 3 — диагональное плоское зеркало, посылающее пучок света на балкон, на котором установлена приемная аппаратура. Диагональное плоское зеркало 3 может занимать положение а или б. Это дает возможность использовать оба балкона и работать в одном из фокусов  $F_1$  или  $F_2$ .

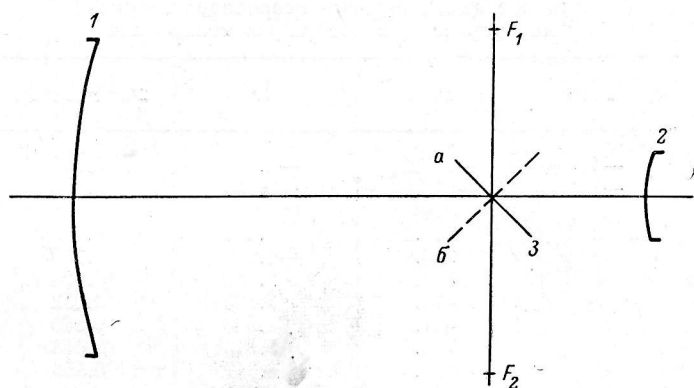


Рис. 3. Оптическая схема неподвижного фокуса без корректора аберрации.

В табл. 6 приведены значения концентрации энергии в пятне рассеивания системы неподвижного фокуса без корректора в зависимости от величины поля зрения.

ТАБЛИЦА 6

Поле зрения		Диаметр пятна рассеивания	Концентрация энергии, %
в мм	в угловой мере		
70.7	1'16''	0.01	100
100	1.48	0.01	90
		0.02	100

Хроматические аберрации в этой системе отсутствуют, так как она чисто зеркальная.

Система вторичного фокуса без корректора может быть использована без смены вторичного зеркала для нескольких приборов, устанавливаемых на балконе. Для перехода от одного прибора к другому предусмотрена перефокусировка вторичного зеркала так, что фокус может находиться на разных расстояниях от оптической оси трубы телескопа. При этом возникает сферическая аберрация. В большинстве случаев ее присутствие не мешает работе ввиду ее малого значения.

Введем обозначения:  $h_2$  — высота крайнего луча на вторичном зеркале;  $s'_2$  — расстояние от вторичного зеркала до фокальной плоскости;  $s_2$  — расстояние от вторичного зеркала до фокуса главного зеркала;  $\Delta$  — величина перемещения вторичного зеркала;  $\Delta'$  — величина смещения изображения от его положения, в котором сферическая aberrация исправлена;  $\delta s'_2$  — продольная сферическая aberrация в пространстве изображений;  $2\delta u$  — сферическая aberrация, выраженная в угловой мере в пространстве перед главным зеркалом.

Сферическая aberrация  $\delta s'_2$  может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\delta s'_2 = [2h_2^2 (s'_2 - r_{02}) s_2^3] / [(2s'_2 - r_{02})^2 s_2^4] \Delta. \quad (5)$$

Для крайнего луча высота падения на главное зеркало равна 3000 мм,  $s_2 = -2951.68$ ,  $s'_2 = 22678.7$ ,  $h_2 = 368.96$ .

Приведем таблицу сферической aberrации телескопа при выводе вторичного зеркала из положения, соответствующего ее исправлению (табл. 7).

ТАБЛИЦА 7  
Влияние дефокусировки вторичного зеркала на сферическую aberrацию телескопа

$\Delta$	$\Delta'$	$\delta s'_2$	$2\delta u$ , сек. дуги
-4	-236.1	-1.813	0.015
-2	-118.1	-0.906	0.008
0	0	0	
2	118.1	0.906	0.008
4	236.1	-1.813	0.015
6	354.2	2.720	0.024
8	472.3	3.626	0.032
10	590.3	4.533	0.040
12	708.4	5.540	0.048
14	826.5	6.347	0.056
16	944.5	7.253	0.064
18	1062.6	8.160	0.072
20	1180.6	9.066	0.080

Система неподвижного фокуса с линзовым объективом, укорачивающим фокусное расстояние

В этой системе главное параболическое  $I$  и вторичное гиперболическое  $2$  зеркала те же, что и в системе 1 : 30.74. Изменение фокусного расстояния достигается путем введения линзовой системы. Она выполнена стеклянной и поэтому обладает вторичным спектром. Вторичный спектр на участке длин волн  $\lambda = 434, 656$  нм составляет 0.33 мм. Оптическая схема этого компенсатора дана на рис. 4.

В табл. 8 даны конструктивные элементы системы 1 : 14.6.

ТАБЛИЦА 8

		$n_1 = +1$	
$r_{01} = -48000$	$e_1^2 = 1$	$d_1 = -21048.33$	$n_2 = -1$
$r_{02} = -6786.65$	$e_2^2 = 1.688057$	$d_2 = 21450.12$	$n_3 = 1$
$r_3 = 619.4$		$d_3 = 38.0$	K8 $n_4 = 1.5163$
$r_4 = 420.7$		$d_4 = 2.0$	$n_5 = 1$
$r_5 = -424.6$		$d_5 = 25.0$	ФГ $n_6 = 1.6128$
$r_6 = -2168$			$n_7 = 1$
$f' = 87695.1$	$s' = 543.7$		

Поле зрения системы составляет  $2l' = 100$  мм.

Первая поверхность укорачивающей системы должна находиться на расстоянии 6447 мм от оптической оси телескопа.

В табл. 9 приведены значения концентрации энергии в пятне рассеивания в неподвижном фокусе для системы, укорачивающей фокусное расстояние.

ТАБЛИЦА 9

Поле зрения		Диаметр пятна рассеивания	Концентрация энергии в % при длинах волн $\lambda$ в нм		
в мм	в угловой мере		486	589	656
70.8	2'10''	0.2	100	100	84
		0.3	100	100	100
100.2	3.48	0.2	83	92	100
		0.3	100	100	100

Оптическая схема этой системы показана на рис. 4. Точка  $F$  на рисунке показывает положение фокальной плоскости системы: главное зеркало +

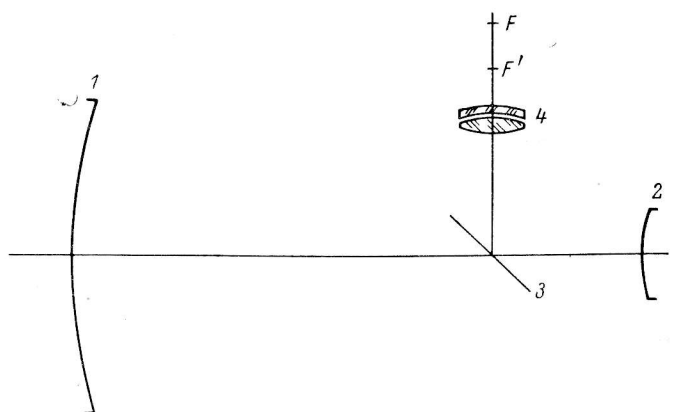


Рис. 4. Оптическая схема неподвижного фокуса с укорачивающей системой.

вторичное гиперболическое зеркало, точка  $F'$  — положение фокальной плоскости всей системы. Эти же обозначения приняты и в последующих схемах.

Диагональное плоское зеркало то же, что и в системе вторичного фокуса без корректора. Объектив 4 укорачивает фокусное расстояние и увеличивает относительное отверстие 1 : 14.62.

#### Система неподвижного фокуса с линзовым объективом, удлиняющим фокусное расстояние

Эта система имеет малую светосилу. Она дает возможность исследовать турбуленцию и состояние атмосферного слоя над телескопом. Фокусное расстояние системы равно 349 000 мм. Главное зеркало, также как и вторичное — гиперболическое, те же, что и в системе 1 : 30.74. Линейное поле зрения составляет 100 мм, что соответствует одной минуте.

Удлиняющая система выполнена из стекла. Вторичный спектр системы для спектрального интервала от 434 до 656 нм составляет 2.2 мм.

В табл. 10 даны конструктивные элементы системы 1 : 58.2.

Первая поверхность удлиняющей системы должна находиться на расстоянии 5952 мм от оптической оси телескопа.

			$n_1=1$
$r_{01}=-48000$	$e_1^2=1$	$d_1=-21048.33$	$n_2=-1$
$r_{02}=-6786.65$	$e_2^2=1.688057$	$d_2=20955.5$	$n_3=1$
$r_3=2421$		$d_3=11$	K8 $n_4=1.5163$
$r_4=619.4$		$d_4=2$	$n_5=1$
$r_5=625.2$		$d_5=13$	ФI $n_6=1.6128$
$r_6=955$		$s'=3221.56$	$n_7=1$
$f'=349396$			

Диаметр пятна рассеивания для спектрального интервала от  $\lambda=404$  до  $\lambda=656$  нм для углового поля  $2\omega=1'$  не превышает  $0''055$ , для спектрального интервала  $\lambda=486$  нм— $\lambda=656$  нм при том же поле не превышает  $0''02$ .

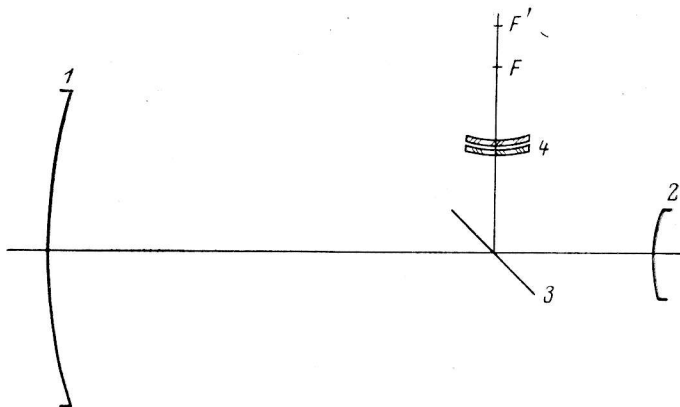


Рис. 5. Оптическая схема неподвижного фокуса с удлиняющей системой.

Оптическая схема этой системы показана на рис. 5. Главное зеркало 1, вторичное гиперболическое 2 и диагональное плоское зеркало 3 те же, что и в предыдущих системах. Линзовый объектив увеличивает фокусное расстояние, давая возможность производить работу в увеличенном масштабе.

### Оптическая система для работы с ИПФ

В телескопе предусмотрена система, дающая возможность работать с ИПФ. Для этой цели на балконе отведено место, где устанавливается специальная система, создающая параллельный ход, в котором помещается ИПФ.

Эта система рассчитана для работы в широком спектральном интервале 300—656 нм. Однако она может быть использована и в более дальней инфракрасной области.

По своему оптическому действию питающая система 1—3 совместно с первым компонентом 4 является телескопической. Оптическая схема этой системы показана на рис. 6.

Фокусное расстояние первого компонента 4 составляет 1528 мм. Увеличение системы, образующей параллельный ход, равно  $120\times$ . Одна угловая секунда перед телескопом примет значение, равное  $2'$  в пространстве, в котором находится ИПФ. Размер зрачка составляет 50 мм. Объектив, создающий параллельный ход, является ахроматом. Поэтому явления, связанные с изменением длины волны, не сказываются на качестве изображения.



Эта система может быть использована не только для длины волны 656 нм, но и для других длин волн.

Длина параллельного хода составляет 250 мм, диаметр светового пучка равен 50 мм.

Второй объектив оборачивающей системы 5, строящий изображение неба в длине волны ИПФ, является положительным. Его фокусное расстояние

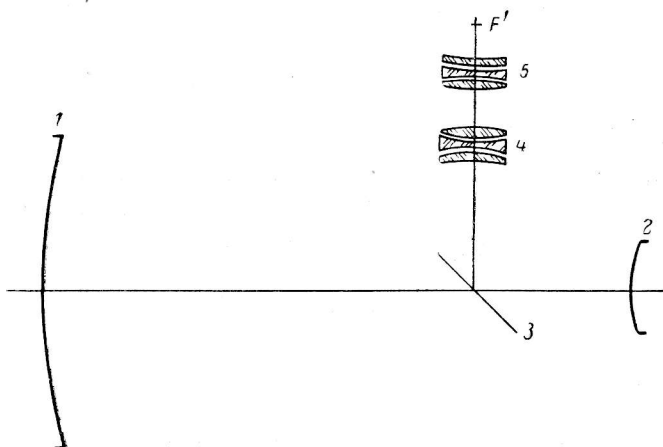


Рис. 6. Оптическая схема неподвижного фокуса с оборачивающей системой для работы с ИПФ.

близко к фокусному расстоянию первого объектива 4. Поэтому в фокальной плоскости системы имеем изображение участка неба в том же масштабе, что и для системы неподвижного фокуса 1 : 30.74.

Первая поверхность отрицательного компонента 4 находится на расстоянии 6164 мм от оптической оси главного зеркала. Фокальная плоскость расположена на расстоянии 1550 мм от последней поверхности положительного компонента 5.

Объектив исправлен на аберрации. Сферическая аберрация для рабочей длины волны  $\lambda=656$  нм исчезающе мала и значительно меньше  $0.01 \lambda$ . Продольная хроматическая аберрация для спектрального интервала длины волны  $\lambda=300$  нм до  $\lambda=656$  нм составляет 0.19 нм. Кружок рассеивания при поле зрения  $\nu'=20$  мм для спектрального интервала от  $\lambda=300$  нм до  $\lambda=656$  нм составляет 0.03%.

Февраль 1975 г.