

УДК 520.25

Исследование оптических характеристик объективов астрографа ГАО АН УССР.**Уравнение блеска и измерение комообразных изображений**

Г. А. Ивацов

Приведены результаты исследования четырехлинзовых объективов астрографа Н/П Карл Цейс Йена ($D=40$ см, $F=2$ м, поле $8^\circ \times 8^\circ$) при различных температурах, зенитных расстояниях и прозрачности атмосферы. В кружке диаметром $2''$ концентрация света около 100 %. Сделано предположение, что вследствие постоянного перераспределения световых пучков, проходящих через объектив, может происходить изменение значений уравнения блеска в течение ночи от пластинки к пластинке. Ошибка разности измерения на пластинке одних и тех же комообразных изображений достигает 5—6 мкм.

INVESTIGATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE ASTROGRAPH OBJECTIVES OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY (KIEV). MAGNITUDE EQUATION AND COMA-LIKE IMAGES' MEASUREMENTS, by Ivanov G. A.—The results of studying the astrograph objectives ($D=40$ cm, $F=200$ cm) for different temperatures, zenith distances and atmospheric transmittance are given. The light concentration is about 100 % in the circle with diameter $2''$. It is supposed that variation in the values of magnitude equation from plate to plate within a night is due to constant redistribution of light beams penetrating through the objective. An error of difference measurement of the same coma-like images on the plate reaches 5—6 μ m.

Исследование аберрации осевых пучков. В ходе выполнения программы фотографического обзора Северного неба (ФОН) [3] проведено исследование некоторых оптических характеристик объективов двойного широкоугольного астрографа (ДША) ГАО АН УССР ($D=40$ см, $F=2$ м). Исследование аберрации осевых пучков проводилось методом диаграмм пронизывания [1, 5] прямым фотографированием диафрагмы Гартмана на пластинку и с применением интерференционного фильтра с $\lambda_{\max} = 419$ нм, т. е. в области ахроматизации исследуемых объективов. Результаты исследования хроматической аберрации объектива приведены в [4]; описание диафрагмы — в [2]. Диафрагма с гексагональным расположением 44 отверстий крепилась непосредственно перед объективом и ориентировалась так, что ее центральное отверстие, служащее для центрировки, совмещалось с оптической осью системы. Пред- и зафокальные снимки диафрагмы получали на одной фотопластинке (ORWO ZU-21) со смещением кассеты между снимками. Экспозиции при фотографировании подбирали такими, чтобы усреднить влияние некоррелированных дрожаний изображений в плоскости пластинки, и они составляли от 1 до 7 минут.

Измерение изображений диафрагмы проводилось на координатно-измерительной машине «Аскорекорд», обработка материала велась по программе, составленной для ЭВМ ЕС-1022 [2].

По мере возможности объектив исследовался при различных температурах, зенитных расстояниях (z), прозрачности атмосферы и в зависимости от времени, прошедшего после открытия купола инструмента (h). Описание фотографического материала (всего получено 20 пластинок) и результаты исследования приведены в табл. 1. Там же приведены длины волн λ используемых интерференционных фильтров, значения «благоприятного» фокуса $F_{\text{выч.}}$, вычисленные с использованием

метода диаграмм пронизывания. Уравнение блеска (УБ) и критерий качества (К) определялись по методике, изложенной в [2]. Наблюдательный материал, за исключением пластинок 558, 614 и 731 (получены Ю. И. Сафроновым), получен и обработан автором.

При анализе данных, представленных в табл. 1, а также их изменений с изменением условий фотографирования, необходима оценка достоверности результатов исследования, т. е. ошибка определения тех или иных параметров. В основном она будет зависеть от ошибки измерения изображений отверстий диафрагмы и ее влияния на изменение параметров оптической системы от пластинки к пластинке. С этой целью в разные дни трижды была измерена и обработана пластинка 114, полученная прямым фотографированием диафрагмы. Изображения краевых отверстий имели комообразный вид, т. е. предполагалось, что ошибка измерения таких изображений и ее изменение будет максимальной. Данные обработки, представленные в графах 1—3 табл. 1, помогли провести оценку достоверности результатов исследования объективов.

Из табл. 1 можно видеть, что значения продольной сферической аберрации изменяются от 0.1 до 0.6 мм, а по пластинкам, полученным с интерференционным фильтром, уменьшаются с увеличением температуры. На примере пластинок 1730—1732 (графы 9—11), полученных в одну ночь, видно изменение значений продольной сферической аберрации, технической постоянной и концентрации света объективами. По-видимому, эти изменения отражают процесс температурного выравнивания внешних и внутренних слоев линз. Концентрация света объективами выше в момент открытия щели купола инструмента, но затем уменьшается (графы 7 и 8, 9 и 11, 15 и 16).

Заметно некоторое уменьшение величины концентрации света объективом 1-й камеры с изменением температуры относительно значений, полученных при температуре, близкой к 4° — 5° С. Сравнение концентрации света и критерия качества, определенных при одной температуре на обеих камерах, показало, что они лучше на I камере, которая и была выбрана в качестве основной при фотографировании по программе ФОН. Разность отсчетов фокусирующей шкалы на обеих камерах при изменении температуры от $+4^{\circ}$ С до $+21^{\circ}$ С составляет 0.30—0.35 мм, что хорошо согласуется с данными, полученными по кривой зависимости фокуса от температуры. Параметры оптической системы существенно не изменяются (I камера) при фотографировании на больших z , что возможно связано с достаточной жесткостью крепления линз в оправе объектива (графа 8).

Рассматривая значения УБ, видим, что они значимо изменяются при сравнении пластинок 114, 558 и 614 (графы 1—5). Однако эти изменения нельзя полностью отнести за счет температурного влияния, поскольку пластинки 558 и 614 получены только при удовлетворительной прозрачности, в то время как пластинка 114 получена при хорошей. Так, в случае сравнения пластинок 113 и 1741 (графы 13—14), полученных при одной температуре, но разной прозрачности, значения УБ значимо отличаются. Условия фотографирования пластинки 1741 были неудовлетворительными. Ухудшение прозрачности приводит к изменению параметров — изображения звезд на пластинке выходят нечеткими, с большим ореолом.

Установление зависимости УБ от температуры, по-видимому, требует проведения более тщательного исследования. Рассматривая значения К можно заметить, что они изменяются не столь резко от пластинки к пластинке, чего нельзя сказать об изменении параметра Т, например, на пластинках 1730—1732 (графы 9—11). Видимо, более плавное изменение параметра К, связанного с концентрацией света объективами, может свидетельствовать в пользу применения этого критерия при оценке качества оптической системы [1].

Разброс параметров $F_{\text{выч.}}$, T , $УБ$, K , продольной сферической аберрации и концентрации света, определенных по пластинке 114, подтверждает сделанные выше предположения о значимости изменения характеристик объективов и их связи с реальными деформациями, возникающими в них при изменении условий фотографирования.

Уравнение блеска. Как известно, основной вклад в ошибку $УБ$ вносят инструментальные факторы, такие как децентрировка и аберрации объектива. Очень часто значения $УБ$, полученные при обработке пластинок, снятых в одну ночь, значимо различаются между собой. Можно предположить, что изменились условия съемки (прозрачность атмосферы, температура воздуха, зенитное расстояние и др.) и произошло перераспределение в фокальной плоскости пучков света, прошедших через различные зоны объектива. На основании результатов исследования оптики объективов астрографа ГАО АН УССР и объективов других астрографов [2] мы попытались проследить изменение значений $УБ$ и перераспределение пучков света, прошедших через отверстия диафрагмы, в фокальной плоскости объектива. Для сравнения брались пластинки, полученные на инструменте в одну ночь, в разные ночи при одной температуре, при разных температурах и др. Фотографируемые звезды на снимках диафрагмы, полученных прямым фотографированием, отличались не более чем на два спектральных класса. Пластинки на инструментах получены после двухчасового проветривания подкупольного помещения (за исключением некоторых на астрографе ГАО АН УССР), т. е. можно предполагать, что за этот промежуток времени линзы объектива приняли температуру окружающего воздуха.

Из общего числа отверстий (44) изображений диафрагмы для дальнейшей работы было выбрано 20 краевых и 16 центральных отверстий. Затем из сравнения двух диаграмм подсчитаны разности положений (разбросы) одних и тех же точек пересечения с фокальной плоскостью объектива каждого пучка света, прошедшего через краевые отверстия диафрагмы, а также через центральные. Было составлено 17 пар сравнения.

Оценивая разбросы лучей, необходимо знать ошибку измерения их положения, которая была вычислена по результатам многократных измерений пластинки 114 и составила ± 2.7 мкм по координате x и ± 2.1 мкм по координате y . Разбросы положений лучей в фокальной

Таблица 1. Результаты исследования объективов широкоугольного астрографа ГАО АН УССР

Характеристики	I камера					
	1	2	3	4	5	6
Номер пластинки	114	114	114	558	614	731
Температура	+4.5°	+4.5°	+4.5°	+19°	+20°	-4°
Фильтр, нм	пр. фот.	пр. фот.	пр. фот.	пр. фот.	пр. фот.	пр. фот.
$F_{\text{выч.}}$, мм	12.95	12.95	12.95	—	—	—
Продольная сферическая аберрация, мм	0.25	0.35	0.29	0.31	0.39	0.55
Техническая постоянная (Т)	0.29	0.28	0.35	0.37	0.41	0.60
УБ, мкм						
X	3.5	1.8	0.6	8.6	5.0	2.8
Y	0.8	2.8	1.4	4.9	0.1	0.8
Концентрация света в кружке диаметром						
1"	64 %	61 %	61 %	37 %	45 %	43 %
2"	96	96	100	84	77	84
3"	100	98	100	91	96	98
Критерий качества (К)	2.76	2.54	2.65	3.58	4.34	3.63
h , ч	2	2	2	2	2	2.5
z	0°	0°	0°	43°	12°	23°

плоскости на разных инструментах лежали в пределах 5—9 мкм для центральных зон и 7—13 мкм — для внешних, причем для центральных зон всегда были на 2—3 мкм меньше краевых. Краевые зоны линз более быстро реагируют на происходящие внешние изменения, что отражается на перераспределении световых пучков. Для пластинок астрографа в Звенигороде (Астросовет) и Зеленчуке (АОЭ), полученных через 2—3 и 5—6 часов после открытия купола, разбросы составили 6—7 мкм для центральных и 7—9 мкм — для краевых, т. е. даже по прошествии 6 часов происходит перераспределение световых пучков, проходящих через объектив. При этом z и температура почти не менялись.

Оценивая значения УБ, отметим, что значимые его изменения при сравнении 17 пар пластинок наблюдались в 6 случаях и достигали 5—8 мкм. В двух из этих случаев сравнивалось перераспределение световых пучков в фокальной плоскости объектива по пластинкам, полученным с разной прозрачностью при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ (табл. 1, графы 13—14) и при $+5^{\circ}\text{C}$ и $+19^{\circ}\text{C}$ (табл. 1, графы 1—4) — астрограф ГАО АН УССР; в двух других — прямым фотографированием диафрагмы и через фильтр (астрограф в Китабе и Зеленчуке (АОЭ)); в остальных — на протяжении одной ночи (астрограф в Зеленчуке (АОЭ) и Звенигороде (Астросовет)). В случае прямого фотографирования и с фильтром в первом приближении можно рассматривать УБ, полученное как бы для звезд разного спектрального класса. Изменение УБ в течение одной ночи объясняется постоянно происходящим перераспределением пучков света, проходящих через объектив. Для наглядности на рис. 1 схематически приведено перераспределение краевых пучков лучей света в фокальной плоскости объектива ГАО АН УССР (пласт. 1730—1732). Цифрами обозначены номера отверстий диафрагмы в процессе измерений.

Представляет интерес определить изменение УБ в течение одной ночи на тех астрографах, где оно велико. В случае значимого изменения его на протяжении ночи можно говорить о том, что постоянное перераспределение пучков света, проходящих через объектив, является основным фактором, приводящим к изменению УБ от пластинки к пластинке.

Наряду с использованием диаграмм пониживания для определения УБ предлагается метод, основанный на применении снимков звездного поля, многократно сфотографированного на пластинке. В резуль-

						II камера				
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1719	1721	1730	1731	1732	1771	113	1741	1739	1740	1774
$+4^{\circ}$	$+4^{\circ}$	$+15^{\circ}$	$+15^{\circ}$	$+15^{\circ}$	$+21^{\circ}$	$+4.5^{\circ}$	$+5^{\circ}$	$+5^{\circ}$	$+5^{\circ}$	$+21^{\circ}$
419	419	419	419	419	419	пр. фот.	пр. фот.	419	419	419
13.65	13.70	—	—	—	13.40	14.80	—	15.35	15.40	15.05
0.22	0.28	0.34	0.55	0.07	0.09	0.21	0.44	0.14	0.32	0.08
0.30	0.18	0.29	0.43	0.16	0.26	0.24	0.53	0.21	0.24	0.18
3.1	2.1	0.4	0.3	2.8	2.6	1.2	6.3	0.9	0.4	0.5
1.9	2.7	3.4	4.1	0.0	0.9	1.0	0.8	1.3	3.5	1.8
50 %	43 %	57 %	48 %	39 %	50 %	36 %	2 %	41 %	34 %	50 %
93	86	95	84	75	89	96	16	93	84	89
100	100	98	96	100	100	100	32	100	95	100
3.00	3.53	3.47	3.66	4.40	3.48	3.07	10.01	3.48	3.77	3.35
0	1.5	0	1.5	2.5	2	2.5	2.5	0	2.5	5
12°	65°	5°	5°	35°	15°	0°	20°	3°	7°	20°

тате фотографирования каждая яркая звезда имеет два ряда изображений (рис. 2). В первом ряду каждое последующее изображение получено с утроением времени экспонирования, что примерно соответствует уменьшению на единицу звездной величины; в нижнем — каждое с экспозицией 10^s . Между экспозициями телескоп смещался по направлению α или δ на величину, равную двум оборотам окулярного микрометра гида. Расстояния между изображениями 1—4 и 2—3 должны

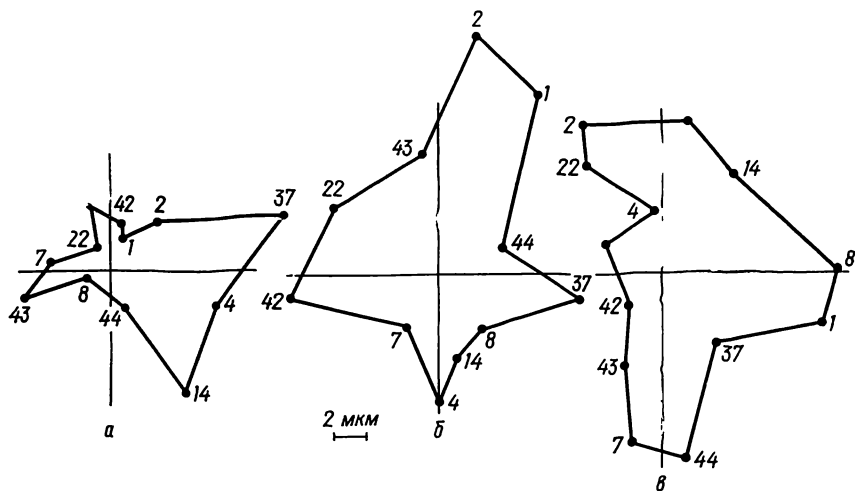


Рис. 1. Перераспределение пучков лучей света в фокальной плоскости объектива, прошедших через краевые отверстия диафрагмы: а — через 0.0^h после открытия щели купола инструмента; б — через 1.5^h ; в — через 2.5^h

- 1(10^s) • 4(30^s) • 5($1,5^m$) • 8($4,5^m$) • 9($13,5^m$)
 • 2(10^s) • 3(10^s) • 6(10^s) • 7(10^s) • 10(10^s)

Рис. 2. Расположение и последовательность получения изображений яркой звезды на пластинке. В скобках указано время экспонирования

быть одинаковыми, поскольку изображения 3 и 4 получены при одном смещении инструмента по α . Однако из-за влияния УБ (инструментальная часть + ошибка измерения изображений разного диаметра) значения в парах 1—4 и 2—3 будут различаться. Расстояния 1—2 и 3—4 могут незначительно отличаться, в основном, на величину мертвого хода окулярного микрометра. То же самое можно сказать о парах изображений 4—5, 3—6 и т. д.

Если для каждой группы изображений яркой звезды взять разности $\Delta l_1 = l_{1-4} - l_{2-3}$, $\Delta l_2 = (l_{1-5} - l_{2-6}) - \Delta l_1$ и т. д., то можно получить относительное (относительно предыдущего изображения) суммарное по обеим координатам изменение УБ. Аналогичные изменения можно получить для звезд разной звездной величины. Усреднив значения смещений Δl_i , взятых для интервалов с примерно равными диаметрами предыдущего и последующего изображений разных звезд и приняв для какого-то диаметра изображения звезды значение УБ равным нулю, можно получить график, аналогичный графику на рис. 3. В нашем случае в обработку были включены 16 звезд, расположенных в круге диаметром 3.5° . Влиянием дисторсии при обработке изображений по этой методике можно пренебречь. При построении кривой применяли метод сглаживания по трем точкам. Средняя квадратичная ошибка определения УБ в среднем составила несколько микрон, т. е. можно утверждать,

что УБ для ДША ГАО АН УССР небольшое, во всяком случае, в интервале диаметров изображений звезд 70—350 мкм. Имея достаточный набор звезд разной величины (диаметра изображений) можно исследовать изменение УБ на большом участке снимка звездного поля, где начинают проявляться эффекты комы и других аберраций, приводящие к искажению формы изображений звезд.

Эффекты измерения комообразных изображений. Результаты трехкратного измерения пред- и зафокального изображений диафрагмы на

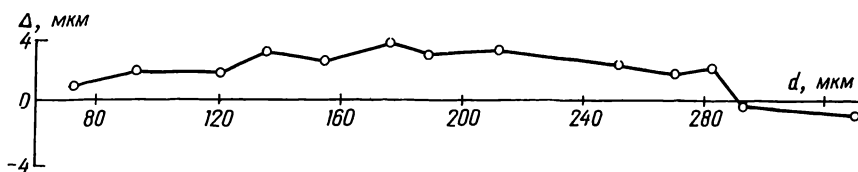
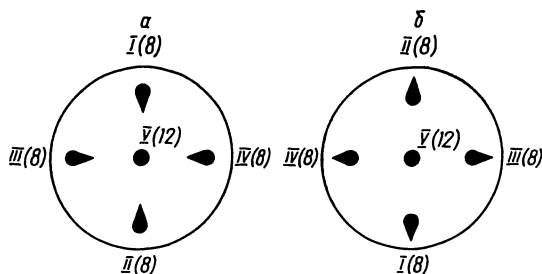


Рис. 3. График УБ объектива II камеры исследуемого астрографа

Рис. 4. Расположение групп точек I—V и внешний вид краевых отверстий в группе на предфокальном (а) и зафокальном (б) снимках диафрагмы. В скобках указано количество измеряемых изображений отверстий диафрагмы в группе



пластинке 114, полученной прямым фотографированием, и двух пластинок 1730 (ГАО АН УССР) и 2864 (Зеленчук) — с применением интерференционного фильтра, позволили оценить ошибку разности измерений положений комообразных изображений. Для этого на снимке диафрагмы были выбраны пять групп точек (отверстий) — четыре на краю и одна в центре. Изображения краевых отверстий на пред- и зафокальном снимках имели противоположно направленные спектральные «хвосты» (рис. 4). Оценка разности измерений положений комообразных изображений проводилась следующим образом. По измерениям 44 отверстий простым усреднением находили центр тяжести системы и определяли расстояния (l_i) до соответствующих точек в группах отдельно для пред- и зафокального изображений диафрагмы. После определения аналогичных расстояний (l_i) при повторных измерениях пластин-

Таблица 2. Значения разностей $\Delta l_{i\text{cp}}$ (в мкм), определенные для пяти групп точек по результатам измерений разных пластинок

Номер группы	Пластинка								
	114						1730		2864
	(1—2) измерение		(1—3) измерение		(2—3) измерение		(1—2) измерение		(1—2) измерение
	Изображение диафрагмы								
	A	B	A	B	A	B	A	B	A
I	+1.8	-0.1	+2.1	-3.0	+0.3	-2.9	-1.4	-0.7	-0.7
II	-0.2	+1.8	+1.8	-2.5	+2.0	-4.3	-0.1	+0.6	+0.1
III	-0.8	-0.7	+2.8	-6.3	+3.6	-5.6	+1.3	+0.4	-1.4
IV	-1.1	-1.1	+3.7	-5.4	+4.8	-4.3	-2.6	0.0	+2.2
V	-0.2	+0.2	+0.1	-0.9	+0.3	-1.1	-1.6	-0.7	+0.3

ки образовывали разности Δl_i , усредненные значения которых для каждой группы точек приведены в табл. 2 для зафокального (А) и предфокального (В) изображения диафрагмы.

Хорошо видно, что в случаях 2—3 и 1—3 (пластинка 114) для групп I—IV имеются систематические различия в значениях разностей, меняющие знак при переходе от пред- к зафокальному снимку. Изменение знака на противоположный указывает на то, что эффект ошибочной оценки центра изображения имеет место и устойчив в процессе измерения, по крайней мере, в течение нескольких часов. То, что в случае 1—2 (пластинка 114) не наблюдается систематических различий в значениях, свидетельствует о том, что эффект или отсутствовал или же присутствовал в равной мере при обоих измерениях пластинки. Для центральной группы точек (V) и групп, измеренных на пластинках, полученных с интерференционным фильтром, систематических различий в значениях не наблюдается. Спектральные «хвосты» в крайних зональных отверстиях почти исчезают, и наведения на центры изображений становятся более уверенными.

В случаях 2—3 и 1—3 для групп I—IV (пластинка 114) значения Δl_i для зафокальных снимков больше, чем для предфокальных. Возможно это объясняется внешним видом изображений, т. е. изображения отверстий предфокального снимка менее четкие, что и сказывается на ошибке измерений. Вообще вид изображения очень сильно влияет на ошибку наведения. Так, измерение изображений звезд на пластинках двойного длиннофокусного астрографа ГАО АН УССР ($D=40$ см, $F=5.5$ м), полученных при удовлетворительной прозрачности атмосферы, показало увеличение ошибок наведения для звезд 10.0^m — 13.0^m в среднем на 40 %.

Значения в группах III—IV больше аналогичных значений в группах I—II (случай 2—3 и 1—3, пластинка 114). В этих группах ориентация «хвостов» диаметрально противоположная и оценка центра изображения в направлении I—II несколько иная, чем в направлении III—IV. При первом наведении на любое из изображений отверстий диафрагмы измеритель находит центр тяжести изображения и при последующих наведениях с поворотом реверсионной призмы, где изображение подводится к измерительной сетке одним и тем же концом, наводит на то же место, которое он запомнил при первом наведении. Почему все эти эффекты не наблюдаются в случае 1—2 (пластинка 114)? Глаз, как оптический прибор, весьма совершенен, но качество измерений зависит от многих факторов и, возможно, в разные дни по-разному находится центр тяжести комообразного изображения, т. е. возникает УБ, вызванное ошибкой измерения. Мы не могли оценить в чистом виде ошибку измерения положений комообразных изображений, но даже значения разностей, достигающие 5—6 мкм, свидетельствуют, что измерение таких изображений представляет определенную трудность.

В процессе измерения изображений диафрагмы мы попытались определить ошибку наведения в начале измерения и по прошествии нескольких часов. С этой целью было промерено 10 комообразных изображений отверстий диаметром 100—120 мкм с интервалом 1.5—2.0 часа. Изображения специально были выбраны не круглые, чтобы разброс ошибок наведения был максимальным. Результаты измерений по пяти пластинкам дали величины ошибок наведения практически совпадающие — 3.6 и 3.5 мкм. Таким образом, можно утверждать, что глаз как оптическая система сразу же активно включается в процесс измерения.

Все эти результаты получены на основании измерений одного измерителя — автора данной статьи. Аналогичные ошибки, например, при оценке центра изображений звезд, могут быть, конечно, присущи и другим измерителям.

Выводы. Результаты исследования объективов ДША ГАО АН УССР свидетельствуют, что они отличного качества и собирают свыше 80 %

света в кружке диаметром 2". Постоянное перераспределение пучков света, прошедших через объектив в фокальной плоскости, может приводить к изменению значений УБ даже на протяжении одной ночи. Величина этой ошибки, определенная по снимкам звездного поля, многократно сфотографированного на пластинке, не превышает 3—4 мкм для изображений звезд диаметром 70—350 мкм в круге размером 3.5°. Измерение положений комообразных изображений представляет определенную трудность, и разница в оценке центра таких изображений может достигать значений 5—6 мкм, что в масштабе ДША составляет 0.5".

1. Иванов Г. А. Сравнительное исследование фотографического и фотовизуального объективов астрографа ГАО АН УССР.— Астрометрия и астрофизика, 1974, вып. 21, с. 21—29.
2. Иванов Г. А., Рахматов Э., Юревич В. А. и др. Сравнительное исследование оптических характеристик объективов астрографов Н/П Карл Цейс г. Йена. Проницающая сила.— Кинематика и физика небес. тел, 1985, 1, № 2, с. 76—81.
3. Колчинский И. Г., Онегина А. Б. План фотографирования неба на широкоугольных астрографах.— Астрометрия и астрофизика, 1977, вып. 33, с. 11—16.
4. Майор С. П., Иванов Г. А., Канивец А. К. Опыт исследования сферической и хроматической аберраций двойного широкоугольного астрографа 400/2000.— Там же, 1982, вып. 47, с. 84—87.
5. Fehlkamp G. Astro-Optikprüfung—ein Anwendungsgebiet des Coordinometers.— Jenaer Rdsch., 1962, N 3, S. 116—120.

Глав. астроном. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию
16.07.1984

РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 523.774

Н. Г. Щукина

НЕРАВНОВЕСНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО КИСЛОРОДА В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

(Препринт ИТФ—84—75Р)

Получены количественные оценки не-ЛТР эффектов на населенности уровней, функции источника, профили, центральные остаточные интенсивности и эквивалентные ширины линий нейтрального кислорода, образующихся на диске Солнца. Не-ЛТР анализ осуществлялся методом линеаризации. Использовалась тринадцатилуровневая модель атома кислорода, несколько моделей атмосферы Солнца (VAL80, HSRA, VAL73, HOLMU) с учетом L_{β} , L_c -накачки излучением водорода, диссоциации молекулы CO, эффектов взаимосвязи линий и других параметров. Был выполнен не-ЛТР синтез профилей линий резонансного ультрафиолетового триплета 1302—6 и дублета 1355—8, красных триплетов 7771—5 и 8446, 9266, 11289 АА. Показано, что населенности возбужденных уровней нейтрального и ионизованного кислорода контролируются полем излучения в линиях кислорода. В хромосфере дополнительным механизмом является поле излучения в свободно-связанном континууме, а для квинтетной системы уровней — L_{β} -излучение водорода. В верхней хромосфере усиливаются эффекты накачки континуума полем излучения в Лайман-континууме L_c водорода. Само поле излучения весьма чувствительно к модели атмосферы. L_{β} -накачка важна при объяснении образования триплета 1302—6 и дублета 1355—8. Для триплетов 7772—5, 8446, образующихся на диске Солнца, она несущественна. Эффекты диссоциации CO невелики.